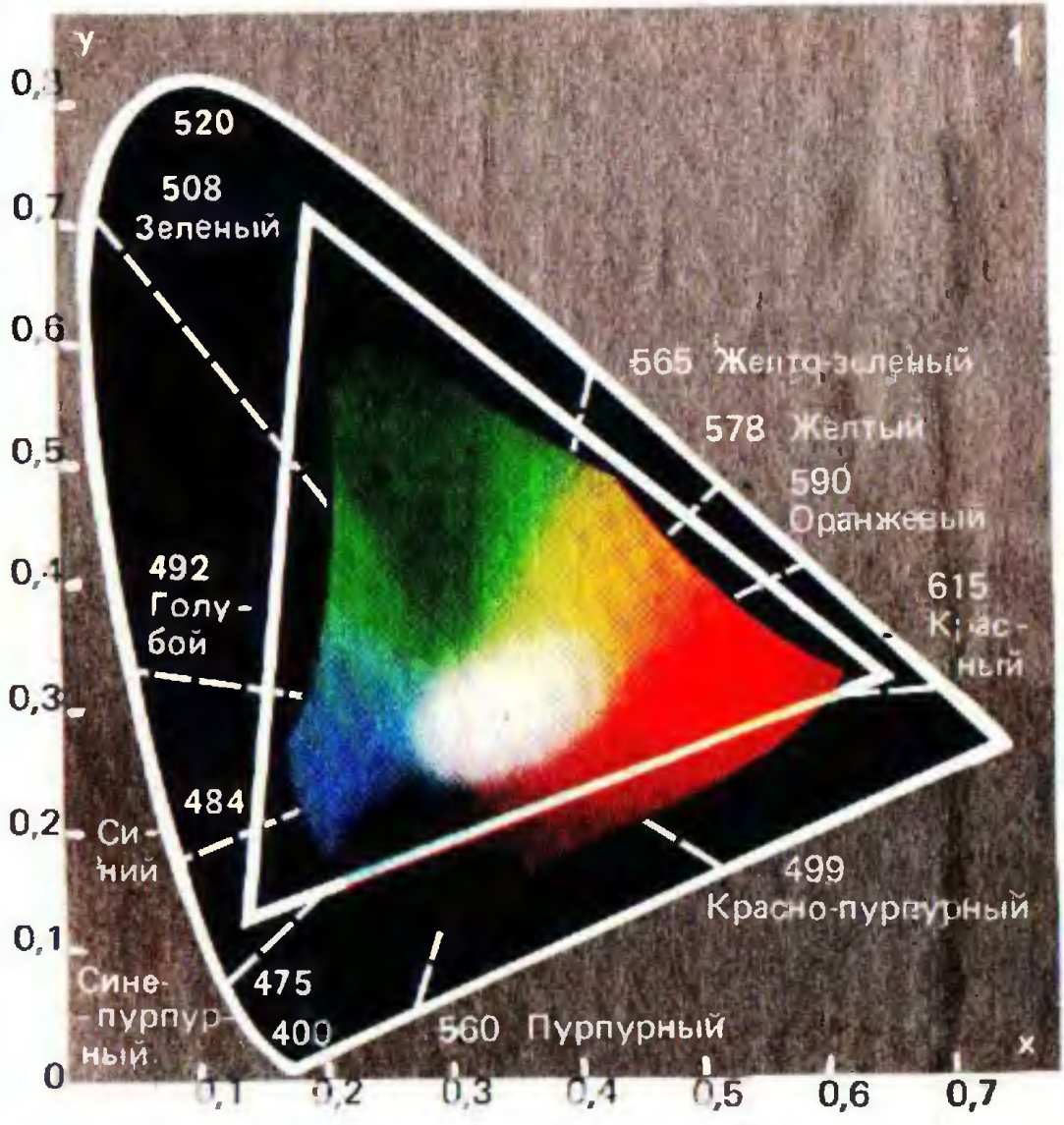
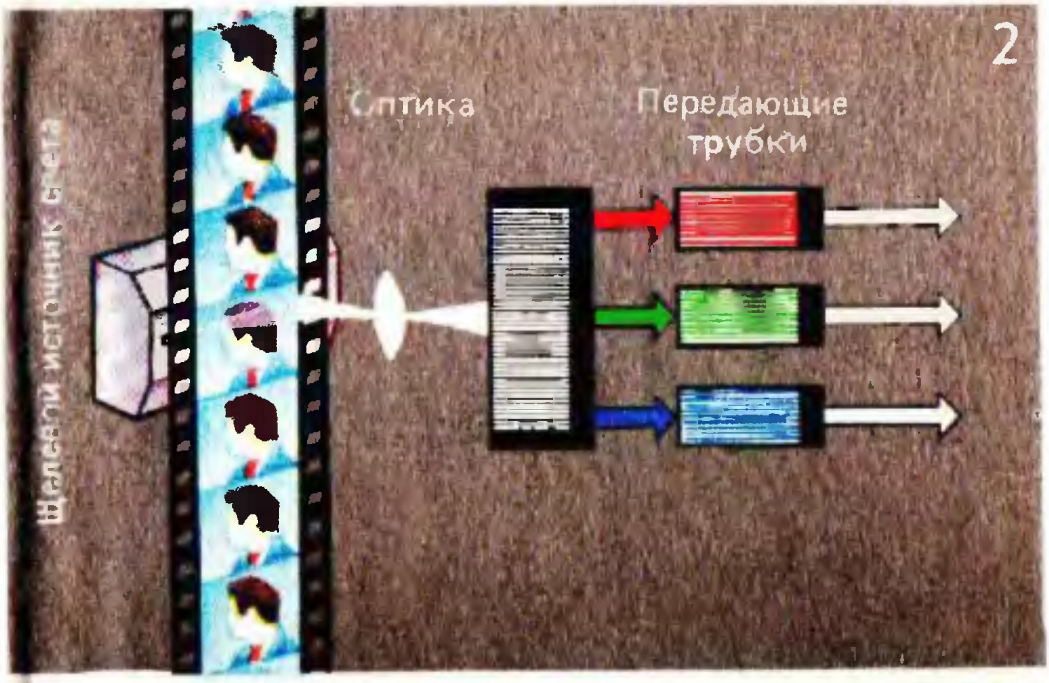
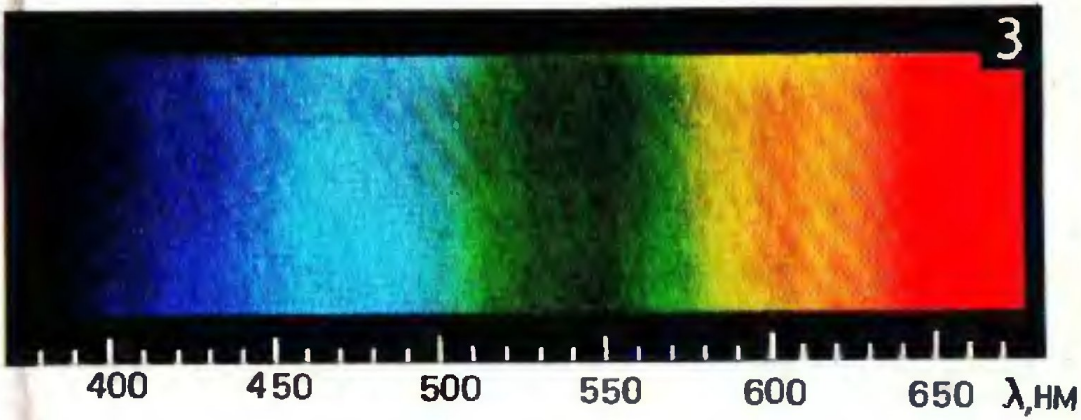
С. В. НОВАКОВСКИЙ

ЦВЕТ В ЦВЕТНОМ ТЕЛЕВИДЕНИИ



1 Диаграмма цветностей:
область используемых цветов
далеко не исчерпывает цветовых ресурсов





2 Метод телевизионной передачи изображений с применением трех передающих трубок

3 Монохроматические цвета видимого спектра

С В НОВАКОВСКИЙ

ЦВЕТ В ЦВЕТНОМ ТЕЛЕВИДЕНИИ

Москва «Радио и связь» 1988

ББК 32.94
Н 72
УДК 621.397(024)

Новаковский С. В.

Н 72 Цвет в цветном телевидении. — М.: Радио и связь, 1988. — 288 с.: нл.

ISBN 5-256-00090-X.

Излагается теория передачи и воспроизведения цвета в телевидении. Для удобства расчетов введены матричные уравнения преобразования координат основных цветов систем определения цвета. Используются методы построения сеток колориметрических величин, основанные на некоторых теоремах проективной геометрии. Рассмотрены вопросы получения цветопередачи высокого качества.

Для инженеров и техников, занимающихся разработкой, производством и эксплуатацией цветового телевидения.

Н $\frac{2402020000-033}{046(01)-88}$ 87—88 **ББК 32.94**

Рецензент: канд. техн. наук, доцент В. Е. Джаконя

Редакция литературы по радиотехнике

Производственное издание

НОВАКОВСКИЙ СЕРГЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

ЦВЕТ В ЦВЕТНОМ ТЕЛЕВИДЕНИИ

Заведующий редакцией В. Л. Стерлигов
Редактор И. С. Балашова
Художественный редактор Т. В. Бусарова
Переплет художника О. С. Белова
Технический редактор И. Л. Ткаченко
Корректор Л. С. Глаголева

ИБ № 1232

Сдано в набор 18.03.87. Подписано в печать 07.12.87. Т 19087 Формат 60×88¹/₁₆
Бумага офсетная № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 18,13.
Усл. кр.-отт. 22,05. Уч.-изд. л. 21,08 (включая цветную вклейку 0,38 уч. изд. л.)
Тираж 15 000 экз. Изд. № 21271 Зак. № 197 Цена 1 р. 40 к.

Издательство «Радио и связь». 101000 Москва, Почтамт, а/я 693

Московская типография № 4 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли 129041, Москва, Б. Переяславская, 46

ISBN 5-256-00090-X

© Издательство «Радио и связь», 1988

ПРЕДИСЛОВИЕ

Цветное телевизионное вещание получило широкое развитие в нашей стране и за рубежом. Техника цветного телевидения непрерывно совершенствуется, растет парк цветных телевизоров, увеличивается число программ цветного телевидения.

Цветные программы Центрального телевидения из Москвы передаются наземными и спутниковыми системами связи во многие города и за рубеж. Растет число специалистов, работающих в области цветного телевидения. Для успешной разработки новой аппаратуры, новых систем, правильной эксплуатации телевизионных центров и парка телевизоров, внедрения цвета в прикладное телевидение необходимо знать фундаментальную теорию цвета и цветного телевидения. Эти знания позволят грамотно разрабатывать и производить аппаратуру и приборы, обеспечивать высокое качество цвета на экранах телевизоров. Основные вопросы теории цвета и цветового зрения, колориметрии, воспроизведения цвета в телевидении, преобразования цвета в сигналы изображения и обратное преобразование являются общими для всех систем цветного телевидения (NTSC, PAL, СЕКАМ). Они систематизированно излагаются в данной книге.

Кодирование и декодирование сигналов цветного телевидения, необходимые для передачи и приема в стандартных системах, а также аппаратура цветного телевидения не рассматриваются, так как это выходит за рамки темы. В настоящее время учение о цвете, его восприятии и измерении представляет самостоятельную область науки — *колориметрию*, достижения которой широко применяются в жизни общества [2...32].

Для всех, кто работает в области телевидения, необходимо хорошо знать не только технику черно-белого телевидения, но и теорию цвета и цветового зрения, колориметрию вообще и колориметрию цветного телевидения. Эти знания нужны для проведения цветовых расчетов, проектирования, регулировки и настройки аппаратуры, измерения и контроля цвета, разработки систем цветного телевидения и т. д.

ВВЕДЕНИЕ

Цветное телевизионное вещание получает широкое развитие — программами цветного телевидения охвачена территория, на которой проживает значительная часть населения СССР, в стране эксплуатируется более 35 млн. цветных телевизоров и их производство с каждым годом увеличивается. Создаваемые Центральным телевидением в Москве программы цветного телевидения по спутниковым и наземным линиям связи передаются во многие города.

Цвет играет большую роль в передаче информации — он не только приближает изображение на экране телевизора к реальному, но и резко увеличивает количество содержащейся в нем информации, способствует более быстрому и полному ее восприятию, вызывает у зрителя положительные эмоции и ощущения, имеет важное смысловое значение.

Переход от черно-белого телевидения к цветному оказался очень сложным и достаточно длительным, так как надо было решить многие новые научные, технические и организационные вопросы. Теперь эти трудности преодолены и цвету в телевидении открыта широкая дорога.

В настоящее время в мире действуют три стандартные системы цветного телевизионного вещания — NTSC (США, Канада, ряд других стран американского континента, Япония), PAL (ряд стран Западной Европы, Австралия), СЕКАМ (СССР, Франция, большинство социалистических стран Европы, ряд стран Азии и Африки). 1 октября 1967 г. было начато регулярное цветное телевизионное вещание из студии на Шаболовке в Москве по совместной советско-французской системе цветного телевидения СЕКАМ, промышленность начала серийный выпуск цветных телевизоров. Система СЕКАМ была принята в СССР в июле 1966 г. Для первой передачи военного парада и демонстрации трудящихся в цветном изображении с Красной площади в Москве 7 ноября 1967 г. использовалась советская передвижная станция цветного телевидения (ПТС-ЦТ). С 1969 г. наша промышленность выпускает унифицированные цветные телевизоры. Цветное телевидение применяется не только для вещания; важное значение имеет оно в народном хозяйстве для прикладных целей (для исследования космоса, в промышленности, на транспорте, в киностудиях, системе обучения, медицине, в научных исследованиях и т. д.).

Высокое качество цветного телевизионного изображения может быть достигнуто только при правильном построении и эксплуатации всех звеньев тракта передачи и приема, которые должны иметь стабильные параметры высокой точности.

Глава 1
ЦВЕТ И ЕГО ВОСПРИЯТИЕ

1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЯ ЦВЕТА. ЦВЕТОВОЙ КРУГ НЬЮТОНА

Электромагнитные колебания от любого источника в диапазоне длин волн 380...780 нм, называемом *видимым спектром*, проникают в глаз человека и создают в его зрительном аппарате ощущения света. Если ощущение создается колебаниями очень узкого участка видимого спектра, то такой световой поток называют *спектральным* (*монохроматическим*), так как он определяется одним значеинем длины волны λ. В зависимости от длиины волиы монохроматические световые потоки создают у человека ощущеиие различного цвета. По аналогии с тонами музыкальной гаммы участки спектра видимого света создают семь главных цветов, как показано в табл. 1.1 и на рис. 1.1*, *а*. Эти цвета входят в состав солнечного света, и их при монохроматичностн называют *спектральными*. Спектр, излучаемый Солицем, не содержнт пурпурных цветов. Вся гамма пурпурных цветов, один из которых показан на рис. 1.1*, *б*, представляет собой сумму красного и синего световых потоков.

Таблица 1.1

Длина волны, нм	Цвет	Длина волны, нм	Цвет
780 . . . 605	Красный	500 . . . 470	Голубой
605 . . . 590	Оранжевый	470 . . . 430	Синий
590 . . . 560	Желтый	430 . . . 380	Фиолетовый
560 . . . 500	Зеленый		

Цветовые ощущения, возникающие в зрительном аппарате человека, определяются пснхофизнческими и психологическими факторами, т. е. зависят от спектрального состава проникающего в глаз света и от свойств зрения. Кроме того, иа ощущение цвета влияют условия наблюдения. Спектральный состав света, приходящего в глаз наблюдателя от самосветящегося тела (источника света), зависит от излучаю-

* Здесь и далее звездочкой помечены номера рнсунков, расположенных на цветной вклейке.

щих свойств этого тела. При наблюдении несамосветящихся тел, отражающих нли пропускающих свет, создаваемый отдельным источником спектральный состав света, приходящего в глаз наблюдателя, определяется спектральными свойствами этих тел и освещающего их светового потока. Например, при освещении данного предмета поочередно источниками света с разными спектрами излучаемой энергин (лампой накаливания, лампой дневного света и т. д.) цвет этого предмета может изменяться. Если все компоненты видимого спектра, воздействующего на глаз, имеют приблизительно равные энергин, то у наблюдателя создается ощущение белого (*ахроматического*) света (цвета).

Таким образом, *цвет* — одно из свойств света, приходящего в глаз наблюдателя, познаваемое наблюдателем при зрительном восприятии и определяемое характеристиками «красный», «зеленый», «синий» и т. д: «...цвет есть результат воздействия физического объекта иа сетчатку = ощущение есть результат воздействия материи на наши органы чувств». (В. И. Леиин. «Материализм и эмпириокритицизм». Полное собрание сочннений. Изд. 5-е. Т. 18. С. 52).

Так как зрительиый аппарат обладает интегральной чувствительностью, т. е. реагирует на сумму всех составляющих видимого спектра, то ощущения одинакового цвета могут создаваться при разных спектральных составах поступающего в глаз света. Это явление называется *метамеризмом*. Два различных по составу спектров световых потока, создающие у наблюдателя ощущеиие одинакового цвета, называют *метамерической парой*. Отсюда можно сделать вывод, что зависимость между спектром света, поступающего в глаз, и ощущением наблюдателя цвета весьма сложна. Данное цветовое ощущение может создаваться большим числом разных спектров восприиимаемого света. Для белого цвета число метамерических пар особенно велико. Следует отметить, что излучения, являющиеся метамерными для одного наблюдателя, могут оказаться не метамериымн для другого. Явление метамеризма зависит также от условий наблюдения.

Каждому цвету соответствует *дополнительный* к нему цвет, обладающий следующим свойством: при смешении (сложении) в определенных пропорциях спектров основного и дополнительного цветов у наблюдателя создается ощущеиие белого цвета. Например, для желтого цвета дополнительным является синий, для оранжевого — голубой, для зеленого — пурпурный и т. д.

Первая система представления цветов была предложена в 1669 г. И. Ньютоном [1], который всю гамму спектральных и пурпурных цветов (всего семь) разместил на плоском графике по окружности (рис. 1.2*). Эту систему называют *цветовым кругом Ньютона*. В центре цветового круга помещается белый цвет *Б*. Цвета, представленные точками на прямой, соединяющей точку *Ц* (эта точка представляет некоторый спектральный цвет *Ц*) с центром круга, создаются сложением спектров цветов *Ц* и *Б* (смесь цветов *Ц* и *Б*, т. е. их сложение) — они в даином случае зеленые. По мере перемещения точки на этой прямой к центру круга возрастает доля энергии белого цвета в смеси цветов

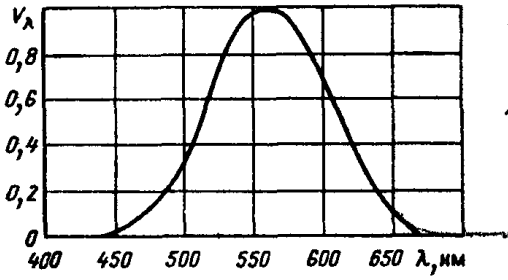
Ц и *Б*, это явление называется *уменьшением насыщенности* цвета смеси (при приближении точки к окружности насыщенность цвета смесн возрастает). Если продолжить прямую *ЦБ* до пересечеиия с окружностью, получим точку, цвет которой $Ц_с$ будет дополнительным (complementary) к цвету *Ц*.

Таким образом, цветовой круг охватывает все цвета видимого спектра. Если на цветовом круге построить радиусы через точки $Ц_1$ и $Ц_2$, то в одиой его части будут находиться *теплые* цвета (красные, оранжевые, желтые, желто-зеленые, зеленые), а в другой — *холодные* (фиолетовые, синие, голубые, голубовато-зеленые)[1].

В настоящее время учение о цвете, его восприятии и измерении представляет самостоятельную область науки — *колориметрию*, достижения которой широко применяются в жизни общества [2—8,76—83].

1.2. СТАНДАРТНАЯ ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ВИДНОСТЬ

В 1924 г. Международная комиссия по освещеиию устаиовила стандартную функцию *относительной видимости* v_λ (рис. 1.3), являющуюся спектральной чувствительностью зрения *стандартного наблюдателя МКО* (получена на основаии статистической обработки результатов измерений, проведенных с миогочнсленными наблюдателями). В табл. 1.2 даны точные значения v_λ. Для определеиия v_λ измеряется величииа, обратная мощиости монохроматнческого излучения, воздействующего на глаз на разных длинах волн при неизменной ощущаемой яркости светового потока. Таким образом, v_λ представляет собой зависнмость ощущаемой яркости монохроматического источника света прн постоянной мощности излучения от длины волны λ. Величина v_λ достигает максимума при $\lambda = 555$ нм. Мощность монохроматического излучения, умноженная на v_λ, дает *световую* (*фотометрическую*) *мощность* этого излучения. Функция v_λ также назы-



Рнс. 1.3. Стандартная функцня относнтельной вндности v_λ

[1] В 1810 г. И. В. Гете разрабатывал теорню цвета н предложил цветовой круг из шестн цветов (голубой, зеленый, желтый, красный, пурпурный, снннй).

Таблица 1.2

λ, им	v_λ	λ, им	v_λ	λ, нм	v_λ
400	0,0004	530	0,862	660	0,061
410	0,0012	540	0,954	670	0,032
420	0,004	550	0,995	680	0,017
430	0,0116	560	0,995	690	0,0082
440	0,023	570	0,952	700	0,0041
450	0,038	580	0,870	710	0,0021
460	0,060	590	0,757	720	0,00105
470	0,091	600	0,631	730	0,00052
480	0,139	610	0,503	740	0,00025
490	0,208	620	0,381	750	0,00012
500	0,323	630	0,265	760	0,00006
510	0,503	640	0,175		
520	0,710	650	0,107		

вается функцией *относительной световой эффективности* стандартного наблюдателя МКО для дневного зрения и обозначается V_λ. При уменьшении мощности излучения максимум чувствительности глаза сдвигается в сторону более коротких световых волн (*эффект Пуркинье*).

1.3. ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ И ПСИХОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦВЕТА

Научно обоснованные системы определения цветов, колориметрические стандарты и терминология по цвету и светотехнике разрабатываются Международной комиссией по освещению начиная с 1920 г. Колориметрия непрерывно углубляется и совершенствуется, и получаемые при этом полезные результаты вводятся в международные стандарты [12—14, 87]. Основана колориметрия на физических (мощность излучения), психофизических (световая мощность излучения) и психологических (ощущение цвета) факторах, характеризующих свет и его восприятие стандартным наблюдателем МКО со спектральной чувствительностью зрения v_λ.

Многочисленными исследованиями установлено, что цвет характеризуется тремя параметрами и поэтому является величиной трехмерной. Применяют две системы таких параметров — психологические (субъективные) и психофизические (объективные) характеристики.

Психологические характеристики цвета оцениваются наблюдателем по зрительному ощущению светового потока (излучения), проникающего в глаз — это наблюдаемые *яркость*, *цветовой тон и насыщенность цвета*. Эти характеристики зависят от условий наблюдения и состояния наблюдателя. Например, *наблюдаемая* (ощущаемая, кажущаяся, воспринимаемая) *яркость* цвета есть оценка наблюдателем ощущения интенсивности (мощности) свечения цветной поверхности (светового излучения). Наблюдаемая яркость оценивается такими определениями, как слепящий, очень яркий, яркий, светлый, темный и др. Для оценки наблюдаемый яркости цвета применяют также понятие *светлоты цвета* — эта относительная оценка ощущения яркости цвета определяется визуальным (зрительным) сравнением в одинаковых условиях яркости данного цвета с яркостью другого (светлее, темнее) или с яркостью соответствующей ступени серой шкалы, или с яркостью белой поверхности. Светлота цвета характеризует относительное ощущение его яркости и связана с мощностью светового потока не линейной, а логарифмической зависимостью по *закону Вебера — Фехнера*: при малых изменениях яркости ($dL/L \ll 1$), ощущение этого изменения dS пропорционально отношению dL/L, а при больших изменениях яркости ΔL оно пропорционально логарифму отношения $(L + \Delta L)/L$. Иногда светлоту цвета определяют как отношение светового потока, отраженного или пропущенного телом, к световому потоку, падающему на его поверхность (в этом случае значение светлоты совпадает с *коэффициентом отражения* или пропускания тела) [4].

Под *цветовым тоном* (*оттенком*) понимают свойство цвета, позволяющее наблюдателю оценить цвет как красный, желтый, зеленый, голубой, синий и т. д. Это главиая характеристика цвета, благодаря которой цвета получили иазвания. Зрение человека различает 120... ...200 основных цветовых тоиов.

Под *насыщенностью цвета* поиимают степень его свободы от примеси белого цвета. Оценивая визуально (зрительно) насыщенность, мы оцениваем долю *спектрального* (*монохроматического*) *цвета*, который в смеси с белым цветом образует данный цвет. Более точно, насыщенность — это число *цветовых порогов*, т. е. едва заметных переходов (изменений), отделяющих данный цвет от белого равиой с ним яркости. Для некоторых спектральных цветов таких порогов может быть 150... ...200. Спектральные цвета имеют максимальную насыщенность, а иасыщенность белого цвета равна нулю.

Цветовой тон, светлота, насыщенность частично взаимно зависимы, например, цветовой тон слегка изменяется при изменении светлоты и насыщенности. При большой яркости все спектральные цвета сдвигаются в сторону сниих или желтых цветов, прн малой яркости— в сторону красных или зеленых.

Цветовой тон и насыщенность характеризуют *цветность светового потока*, независимо от его яркости. Таким образом, цвет можно характеризовать яркостью и цветностью, т. е. цветность — величиина двумерная.

Психофизические характеристики цвета— три параметра (три числа) светового потока (излучения), оцениваемые стандартным наблюдателем МКО, т. е. три параметра, которые можно измерить физическими приборами с учетом особенностей цветового зрения этого наблюдателя (такие приборы называют *фотометрическими*): *яркость* (в абсолютных едииицах), *преобладающая длина волны и чистота цвета*.

Под *яркостью цвета* (светового потока или цветной поверхности) понимается значеиие светового потока (т. е. мощность излучения, оцененная глазом стандартного наблюдателя МКО), излучаемого в данном направлении единицей площади поверхностн в пределах единичного телесного угла. Яркость измеряется в канделах на метр в квадрате.

Под *преобладающей* (dominatio) *длиной волны цвета* поиимают длину волны монохроматического (спектрального) света λ_d, цветовой тон которого такой же, как у данного цвета. Этот монохроматический цвет при сложенни с заданным белым цветом дает данный цвет. Так как пурпурный цвет не содержится в солнечном спектре, то для него под преобладающей длиной волны понимают длину волны дополнительного к нему монохроматического цвета и обозначают ее $\lambda_{\acute{d}}$ или знаком «минус», например $\lambda_d = -520$ нм.

Под *колориметрической чистотой цвета* (светового потока F) понимают относительное содержанне в ием спектрального цвета (моно-

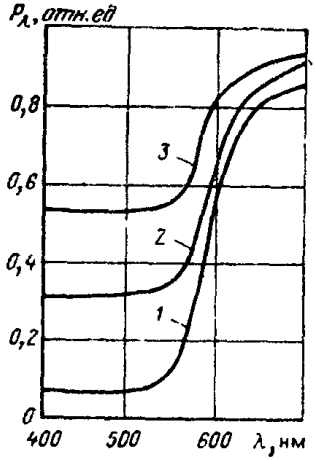


Рис. 1.4. Характеристики спектральной плотности мощности излучения для красных поверхностей с различной насыщенностью световых потоков:
1 — высокой, *2* — средней, *3* — малой

хроматического светового потока F_λ), т. е.

$$p_к = F_\lambda / F = F_\lambda / (F_\lambda + F_б), \qquad (1.1)$$

где $F = F_\lambda + F_б$, причем $F_б$ — белый световой поток.

Применяют еще понятие *чистота возбуждения* (условная чистота) $p_в$, под которой понимают величину, определяемую с помощью координат цветности или отрезков прямых на диаграмме цветностей, о чем будет сказано в § 2.14. Для спектральных цветов $p_к = 1$, так как $F_б = 0$. Для белого цвета $p_к = 0$, так как для него $F_\lambda = 0$. Величинами λ_d (или $\lambda_{\acute{d}}$) и $p_к$ объективно определяется цветность светового поток независимо от его яркости.

Обнаружено, что две поверхности с одинаковой цветностью и с одинаковыми значениями яркости, измеренной в канделах на квадратный метр, наблюдатель может видеть как имеющие разную светлоту, если условия их наблюдения различны. В этом случае при изменении цветности одиой из поверхностей (их значения яркости одинаковые) светлоты этих поверхностей будут казаться различными даже в одинаковых условиях наблюдения. Цветовой тон световых потоков (рис. 1.4) определяется местом в спектре наиболее интенсивно излучаемой мощности, а насыщенность зависит от того, на сколько мощность этой части спектра преобладает над мощностью остальной его части. Следовательно, световые потоки, спектры которых показаны на рис. 1.4, являются красными и кривая *1* соответствует наибольшей насыщенности.

Цвет как величина трехмерная может быть представлен точкой в системе цилиндрических координат, в которой его яркость представлена расстоянием от начала координат вдоль оси системы. Любая плоскость, перпендикулярная оси системы, является *плоскостью постоянной яркости*. Цвет определенной яркости изображается на ней точкой: длина радиуса, соединяющего эту точку с осью системы, определяет насыщенность цвета, а его направление — цветовой тои. При вращении радиуса цветовой тон плавно изменяется от красного к желтому, далее к зеленому, голубому, синему и пурпурному, т. е. в системе цилиндрических координат реальные цвета образуют некоторое *цветовое тело* (рис. 1.5*).

Современная термнология по цвету и светотехнике содержится в Международном светотехническом словаре (900 терминов), изданном МКО в 1970 г. на французском, английском, немецком и русском языках [14].

1.4. ЦВЕТОВОЕ ЗРЕНИЕ

Общие положения. Процесс восприятия цвета глазом называется *цветовым (хроматическим) зрением* [5]. Известно, что глаз человека имеет два вида световосприиимающих клеток (рецепторов), называемых *колбочками* и *палочками*, расположенных на *сетчатке* (ретине) и являющихся окончанием нервных волокон. Колбочки создают ощущение яркости и цвета светового потока, а палочки реагируют только на его яркость и позволяют иам видеть слабо освещенные предметы.

При достаточно большой яркости светового потока (не менее 1 кд/м^2) в процессе видения участвуют, главным образом, колбочки (*дневное* или *фотопическое видение*) с максимальной чувствительностью иа волне 555 нм. При малой яркости светового потока (менее 0,001 кд/м^2) в процессе видения участвуют только палочки (*сумеречное или скотопическое видение*) с максимальной чувствительностью на волне 510 нм; глаз не различает цвета н зрение становится *ахроматическим* (бесцветным). Сдвиг максимума чувствительности зрения с волны 555 на 510 нм при переходе от дневного видення к сумеречному был открыт в 1823 г. чешским учеиым Пуркинье. Это явление приводит к тому, что в сумерки зеленый цвет нам кажется более ярким, чем желтый, а красный цвет кажется черным (все эти цвета в сумерки видим как серые). Каждое нервное волокно соединено на сетчатке с одним рецептором или с их группой, все нервные волокна собраны в один пучок (зрительный нерв); такне пучки от обоих глаз идут в мозг, где разветвляются на оба полушария мозга, так что к каждому полушарию подходят нервные волокна от обоих глаз. Наибольшая плотность размещения колбочек имеет место в цеитральной области сетчатки, называемой *фовеа* (желтое пятно), имеющей диаметр около 1,5 мм с угловым размером 5° (угол, под которым видиа фовеа из центра зрачка). Центральная часть фовеа с угловым размером около 1° (диаметр 0,5 мм), называемая *центральной ямкой*, содержит только колбочки (в количестве около $3 \cdot 10^6$), и каждая колбочка соединена с отдельным нервным волокном — это место наиболее четкого видения. В области с угловым размером 2° (диаметр 1 мм) помещается 50 000 колбочек, палочек здесь нет. По мере удаления от фовеа плотность палочек на ретине вначале увеличнвается, затем уменьшается. Диаметр колбочек 0,001...0,005 мм (в центральной ямке он наименьший). Всего на сетчатке имеется 7 млн. колбочек и 130 млн. палочек.

В палочках и колбочках содержится светочувствительный пигмент — *родопсин*, поглощающий свет. В результате поглощения света концентрация родопсина падает. В колбочках свет преобразуется в нервные импульсы в результате химической реакции в пигментах. Обнаружены три типа колбочек, пигменты которых имеют максимальное поглощение света на волиах 448, 528 и 567 нм соответственно.

В области фовеа глаз обладает наибольшей остротой зрения и наилучшим восприятием цвета. Поэтому в нормальных условиях наблюде-

ния глазное яблоко находится в непрерывном движении, так что рассматриваемая часть предмета фокусируется на фовеа, а чувствительность зрения к изменениям яркости значительно выше, чем чувствительность к изменениям цвета. Например, небольшие периодические изменения яркости света создают такие же ощущения мерцания, как и значнтельные изменения цвета (при одинаковой частоте изменений).

Трехкомпонентная теория цветового зрения М. В. Ломоносова основана на экспериментальном факте, что все цвета могут быть получены путем сложения трех световых потоков (спектров) — красного, зеленого и синего цветов с высокой насыщенностью (т. е. близких к спектральным цветам). Общие принципы цветового зрения были впервые открыты великим русским ученым М. В. Ломоносовым, сформулировавшим в 1756 г. *трехкомпонентную* (*трехрецепторную*) *теорию* восприятия зрением цвета [6]. Ломоносов пришел к выводу, что зрительный аппарат человека имеет три вида рецепторов, воспринимающих световую энергию. Один из них воспринимает красную часть светового спектра, другой — желтую, третий — голубую. Эти три цвета называют *основными* (*первичными*). Характер цветового ощущения зависит от отношения энергий возбуждения трех видов рецепторов. При равной энергии возбуждения трех видов рецепторов создается ощущение белого цвета. В дальнейшем теория цветового зрения Ломоносова была развита в Англии Т. Юнгом (1802 г.) [76] и в Германии Г. Гельмгольцем (1852 г.) [77] и за основные цвета были приняты красный, зеленый и синий. До настоящего времени нет законченной теории цветового зрения, хотя проведено очень много исследований.

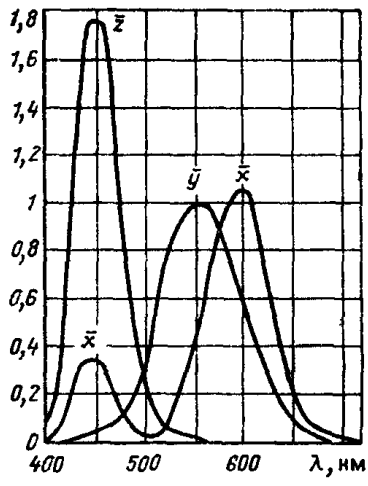


Рис. 1.6. Кривые основных возбуждений зрения (кривые сложения) Н. Т. и В. И. Федоровых, соответствующие ощущениям цветов.

$\bar{z}$ — синего, $\bar{y}$ — зеленого, $\bar{x}$ — красного

Одним из подтверждений теории Ломоносова служит явление *Бецольда — Брюкке*, состоящее в том, что при ослаблении яркости различаются только красные, зеленые и фиолетовые цвета, а оранжевые, желтые и голубые воспринимаются красными, зелеными и синими соответственно. А. Кёниг и К. Дитеричи в 1892 г. экспериментально определили *кривые спектральной чувствительности* зрения (*кривые основных возбуждений зрения*). В 1935 г. в СССР Н. Т. и В. И. Федоровы предложили аналогичные кривые [7] (рис. 1.6), которые хорошо соответствуют многим явлениям, наблюдаемым при изучении цветового зрения (площади под тремя кривыми одинаковы) и весьма

близки к кривым Кёнига и Дитеричи. Уточненные кривые были получены Е. Н. Юстовой [8].

Важной особенностью цветового зрения человека является то, что яркость предметов воспринимается суммированием ощущений создаваемых тремя типами рецепторов, а цвет определяется отношением этих ощущений.

Цвет мелких предметов. А. Кёниг (Германия) в 1894 г. экспериментально установил, что для мелких предметов, фокусируемых на центральной ямке сетчатки, зрение человека дихроматично (двухцветно), так как эта часть сетчатки обладает слабой чувствительностью к синей части спектра. Кёнигу удалось согласовать (воспроизвести) для таких предметов все цвета спектра с помощью только двух основных спектральных цветов с длинами волн 475 и 650 нм. Позднее этот факт был подтвержден рядом других исследователей [78—80], и было установлено, что дихроматизм при нормальном зрении наблюдается уже при *угловом размере предметов* $\varphi = 10...20'$ (угол с вершиной в центре зрачка, измеряемый в минутах). При расстоянии наблюдения d и диаметре предмета D угол в минутах, под которым виден предмет, $\varphi' = 57{,}3 \cdot 60\, D/d = 3438\, D/d$. Отсюда $d = 3438\, D/\varphi'$ (копейка имеет диаметр 1,5 см и видна под углом 15′ на расстоянии $d = 3{,}44$ м). При наблюдении мелких предметов с такими размерами нормальное зрение обладает свойствами *тританопии*, т. е. не отличает синего от зеленого, красного от пурпурного цветов. Цвета мелких предметов наблюдатель воспринимает как смесь оранжевого и голубого. При наблюдении более мелких предметов наблюдатель перестает воспринимать цвет и видит их как черно-белые, что было подтверждено опытами А. Бедфорда в 1950 г. При этом, если на размытую границу перехода от одного цвета к другому наложить четкий переход между яркостями этих цветов (или если на размытую границу перехода между яркостями двух цветов наложить четкий переход от одного цвета к другому), то наблюдатель увидит четкий переход от одного (яркого) цвета к другому (темиому) цвету.

Количество воспринимаемых человеком цветов зависит от многих факторов (условий наблюдения, состояния наблюдателя и т. д.) [9, 10, 81—85]. Если учитывать различие цветов по яркости, цветовому тону и насыщенности, то, как считают некоторые специалисты по колориметрии (например, Д. Джадд), человек способен различать около 10 млн. цветов, отличных друг от друга по этим трем параметрам. Есть сведения о том, что если учитывать только отличие по цветовому тону и насыщенности, то человек способен различать до 17 000 отдельных цветностей при угловом размере окрашенного предмета 2°; яркости фона 50 кд/м^2, угловом размере фона 50°. Есть также сведения, что глаз способен различать 7300 отдельных цветностей, из них в области пурпурных, красных и синих цветов разной насыщенности — 5500. Что касается различий между спектральными цветами, то, по данным Райта, человек способен различать 150 таких цветов и 30 насыщенных пурпур-

ных цветов (по данным Мак-Адама 250 спектральных и 140 насыщенных пурпурных цветов).

В цветовых атласах и словарях [9, 10, 84, 85] содержится обычно 4000...6000 различных цветов. Так «Словарь цветов» А. Мэрца и М. Р. Пауля издания 1930 и 1950 гг. (США) содержит 7000 названий цветов; из них 36 выражены отдельными словами (имеющими цветовой смысл), около 300 сложными словами, около 90 названиями известных окрашенных предметов; таким образом, около 400 хорошо различаемых цветов. При этом основных физических цветов — восемь (красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый, пурпурный), а основных психологических цветов, т. е. резко отличающихся друг от друга и называемых *унитарными*, четыре (красный, желтый, зеленый, синий). Краски составляются из красителей (пигментов). Добавление черного пигмента к чистым пигментам позволяет получить новые цвета: оливковый (желтый плюс черный), коричневый (желто-оранжевый плюс черный, или оранжевый плюс черный, или красный плюс черный).

В «Атласе системы естественных цветов» (Швеция) содержится 7000 названий и 1400 образцов цвета, в Атласе цветов Манселла (США, 1929 и 1976 гг.) 267 основных названий и около 2000 образцов, в Атласе цветов Оствальда (1948 г.) 680 названий цветов.

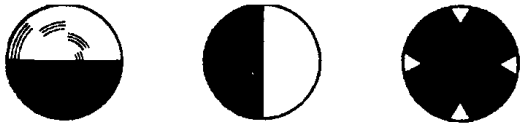
Выработка названий цветов при таком большом их количестве дело весьма сложное. В 1939 и 1955 гг. Межведомственный (межотраслевой) комитет (совет) по цвету ISCC совместно с Национальным Бюро Стандартов США (NBS) разработали систему ISCC—NBC из 7500 названий цветов, в которой основными являются красный, желтый, зеленый, синий, пурпурный, оливковый, коричневый, розовый. К этим названиям можно добавлять такие слова, как слабый, сильный, светлый, темный, очень бледный, блестящий, глубокий (очень темный), сумеречный (слабо темный), живой (очень светлый). Можно применять для промежуточных цветов комбинации слов, например «красновато-пурпурный» и т. д. Всего в этой системе 319 названий. В соответствии с этим введено шесть уровней точности названий цветов. *Первый уровень* — достаточно девяти названий цветового тона (розовый, красный, оранжевый, коричневый, желтый, оливковый, желто-зеленый, синий, пурпурный). *Второй уровень* добавляет еще 16 названий промежуточных цветов (желтовато-розовый, красновато-оранжевый, красновато-коричневый и т. д.). *Третий уровень* — 267 названий (добавляются термины, указывающие степень светлости и воспринимаемой чистоты: живой или чистый, яркий, интенсивный, глубокий, очень глубокий, очень светлый, светлый, средний, темный, очень темный, очень бледный, бледный, светлый сероватый, темный сероватый, черноватый). *Четвертый уровень* — 1 000...10 000 цветов, обозначенных цифровыми или буквенными кодами. *Пятый уровень* — 100 000 названий, получающихся путем визуальной интерполяции среди образцов Манселла. *Шестой уровень* — $5 \cdot 10^6$ цветов, определяемых измерением их координат цветности.

Аномалии цветового зрения. Лиц, обладающих нормальным цветовым зрением (т. е. различающих красный, желтый, зеленый и синий цвета), называют *трихроматами*. Их более 95 % населения. Цветовое зрение у трихроматов полноценно только в пределах угла 10° от центральной ямки в направлении к носу. В зоне 10 ... 30° они различают только желтые и синие цвета (*дихроматизм*), в зоне более 30° совсем не различают цвета. В сторону виска в зоне до 35° зрение у них является трихроматичным, в зоне 35 ... 50° различаются только желтый и синий цвета, в зоне 50 ... 60° только синий, в зоне далее 60° цвета не различаются.

Около 6 % населения страдает пониженной чувствительностью к одному из трех основных цветов — красному, зеленому и синему (*аномальный трихроматизм*). Около 2 % населения обладает дихроматизмом, т. е. чувствительностью только к двум основным цветам. Интересно отметить, что среди дихроматов женщины составляют только 1,5 %. Известны различные виды дихроматизма — *протанопия* и (около 1 % мужчин не различают красного цвета), *дейтеранопия* (около 1 % мужчин не различают зеленого цвета), *тританопия* (менее 1 % мужчин не различают фиолетового цвета). При тританопии синий и зеленовато-желтый цвета воспринимаются как серые, различие между синевато-зелеными и желтовато-зелеными, а также между пурпурными и оранжево-красными цветами замечается плохо, а на красном, оранжевом и голубом цветах у тританопов зрение нормально.

1.5. СУБЪЕКТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ЦВЕТОВЫХ ОЩУЩЕНИЯХ

Последовательный и одновременный контрасты цветов. Если после напряженного наблюдения небольшой зеленой полоски (вследствие чего снижается чувствительность к зеленым цветам) перевести взгляд на большую белую поверхность, то в течение некоторого времени будем видеть на ней полоску, окрашенную в цвет, приблизительно дополнительный к зеленому (т. е. пурпурный в данном примере), который быстро исчезает. Этот цвет называют *последовательным образом*, он быстро исчезает. Таким образом, если после наблюдения окрашенной поверхности перевести взгляд на поверхность с другим цветом, то цвет последней оказывается вначале измененным под действием последовательного образа. Это явление называется *последовательным цветовым контрастом*. Известно другое явление. При наблюдении двух цветов, помещенных рядом, увеличивается их различие по цветовому тону. Если, например, положить две полоски синей материи на большие куски (фон) красной и зеленой,то синие полоски будут восприниматься как поверхности разного цвета — цвет каждой из них сдвинется в сторону цвета, дополнительного к цвету фона. Если поместить рядом предметы оранжевого и желтого цвета, то они будут казаться красновато-оранжевыми и зеленовато-желтыми. Если поместить рядом предметы двух цветов одного и того же цветового тона, но с разной насыщенностью, то цвет с меньшей насыщенностью будет казаться дополнительным к другому и различие в насыщенности увеличится. Это явление называют *одновременным цветовым контрастом*. Вследствие такого контраста любой цвет на фоне дополнительного к нему цвета кажется более насыщенным. Если же цвет предмета менее насыщен, чем цвет фона, то насыщенность цвета предмета кажется сниженной.



а) б) в)

Рис. 1.7. Диски для получения субъективных цветов

На фоне теплых цветов это явление выражено сильнее, чем на фоне холодных. Известен также *одновременный контраст яркостей*, состоящий в том, что поверхность кажется более светлой, если она окружена темным фоном по сравнению с тем, когда фон светлый. Различие светлот двух поверхностей увеличивается, если их поместить рядом.

Субъективные цвета. При наблюдении чередующихся в определенной последовательности черно-белых изображений может возникать ощущение ненасыщенного цвета. Так, Бейхам наблюдал это явление, рассматривая вращающийся по часовой стрелке диск диаметром 20 см (рис. 1.7, *а*), который делал 8 об./с. При таком вращении диск кажется окрашенным в синий цвет по краю, в зеленый — в средней части, в желтый и красновато-коричневый — в центре. При вращении против часовой стрелки середина диска кажется синей, а край — красным. Однако не все наблюдатели способны видеть это явление. На рис. 1.7, *б* и 1.7, *в* показаны варианты дисков, создающих подобное явление. Это явление объясняется тем, что зрение быстрее возбуждается зеленым цветом, чем красным и синим, содержащимися в белой части диска. Предпринимались попытки передавать изображение таких вращающихся дисков по телевидению, чтобы получить окраску изображений на экране черно-белого телевизора, но регулярного применения эти опыты не получили. Возникающие при этом цвета зависят от формы фигуры и имеют малую насыщенность.

Гармония цветов. Известно, что, в зависимости от условий наблюдения, определенные сочетания находящихся рядом различных цветов кажутся приятными (гармоничными) и вызывают положительные эстетические ощущения (эмоции). Гармоничное сочетание цветов позволяет получить наилучшее эмоциональное и смысловое восприятие сюжета наблюдаемой сцены. Закономерности гармонии цветов основаны, главным образом, на практическом опыте, но противоречивы для разных наблюдателей и зависят от размеров, композиции и самих цветов, формы окрашенных предметов и смысла изображения. В ряде случаев рекомендуется: сочетать дополнительные цвета или, наоборот, близкие по цвету цвета, цвета с одинаковой насыщенностью или с одинаковой яркостью, светлые или темные. Сочетание большого числа различных цветов (пестрота) негармонично, с другой стороны, сочетание близких по цвету цветов приводит к монотонности. Серый цвет хорошо гармонирует с любым цветом, хорошо гармонируют цвета, разделенные на одну треть цветового круга. Рекомендуется иметь распределение яркости в цветах, близкое к естественному, для чего нужно сочетать светлые цвета с белыми.

Двухцветная система воспроизведения цветов. В 1959 г. Э. Лэнд повторил [11] опыт Д. К. Максвелла — получил цветное изображение

с помощью черно-белой фотографии. Максвелл в 1861 г. фотографировал окрашенный объект на три черно-белые фотопластинки: на первую — через красный, на вторую — через зеленый, на третью — через синий светофильтры, — и получил три *цветоделенных* негатива. Полученные с помощью этих негативов три позитнва он проецировал на однн экран через те же самые светофильтры, освещая позитивы источнпками белого света. В результате сложения на экране трех изображеннй красного, зеленого н снего цветов получилось изображение в натуральных цветах. Э. Лэнд использовал только два позитива, полученные фотографированием через зеленый и красный светофильтры, проецируя на экран первый из них через зеленый светофильтр или без светофнльтра (т. е. в черно-белом внде), а второй — через красный светофильтр. При этом на некоторых сценах на экране наблюдалась гамма цветов, включая голубой, что объясняется сдвнгом (под влнянием цветовой адаптации) белого цвета в сторону голубого, являющегося дополнительным к красному цвету. Отмечено прн этом, что многие наблюдатели вндят желтый н синий цвета на небольших участках изображения. Однако эти субъективные явления наблюдаются только при определенном сочетании цветов в сцене, и поэтому такой способ не пригоден для разнообразных сцен.

На основе этих опытов были сделаны неудачные попытки опровергнуть трехкомпонентную теорию цветового зрения. Ряд исследований другнх авторов показал, что в двухцветной системе Лэнда возникают большие искажения цвета, гамма воспроизводимых цветов мала, насыщенность полученных цветов низкая [11].

1.6. АДАПТАЦИЯ ЗРЕНИЯ

Адаптацней зрения называют процесс его приспособления к действию на зрительный аппарат светового потока. Адаптация зрення может быть дневной, темновой и цветовой. *Дневная* и *темновая адаптации* являются адаптацнями зрения к яркости света, *цветовая адаптация* — к измененням спектра светового потока.

Адаптацня зрения к яркости. При яркости 10^6 кд/м^2 наступает ослепленне. При яркости более 150...200 кд/м^2 палочкн не работают, а действуют только колбочки. Диапазон яркостей различных предметов, окружающих нас в дневное время, очень велик 0,1... ...30000 кд/м^2 (черный бархат и свежий снег при ярком солнечном свете соответственно). Зрительный аппарат человека не может одновременно воспринимать весь диапазон яркостей, он самонастраивается на преобладающнй уровень яркости, в результате чего поверхности с яркостью выше средней кажутся светлыми, а поверхности с яркостью ниже средней — темнымн. Для каждого уровня яркости, на который адаптируется зрение, имеется определенный уровень, создающий ощущение черного, а днапазон яркостей, создающих ощущения от черного до белого, зависнт от уровня адаптации. При адаптации изменяется и светочувствительность зрения. Время адаптации к свету около 0,2 с. Ночью

большне поверхностн вндны, еслн нх яркость 10^{-6} кд/м^2 н более. Прн яркостях менее 10^{-3} кд/м^2 работают только палочкн, а прн яркостях больше этого значення работают н колбочкн. В темноте зренне адаптируется за 10...15 мнн. Благодаря адаптацнн человек воспрнннмает огромный днапазон яркостей 10^{-6}...10^6 кд/м^2, т. е. 12 порядков.

Адаптацня зренння к цвету [86] состонт в том, что источник яркого цвета сннжает чувствнтельность рецепторов этого цвета в зрнтельном аппарате и повышает чувствнтельность тех нз ннх, которые возбуждаются слабо, в результате чего нзменяется воспрнятне ряда цветов н увелнчнвается цветовой контраст (разлнчне в цветностях) соседннх поверхностей. Под влняннем адаптнрующего цвета другой цвет кажется сдвннутым в сторону цвета, дополннтельного к адаптнрующему. Напрнмер, яркий снннй цвет сннжает чувствнтельность «синего» рецептора н делает голубой цвет зеленоватым. Измененне воспрнятня одного цвета под влняннем другого нмеет место н в том случае, когда оба цвета нмеют одннаковый цветовой тон, но отлнчаются по насыщенностн (цветовой тон менее насыщенного цвета нзменяется в сторону дополннтельного цвета под влняннем на зренне более насыщенного цвета, что приводнт к увелнченню цветового контраста).

Благодаря цветовой адаптацнн зренння довольно шнрокую гамму цветов наблюдатель воспрнннмает как белые цвета, еслн наряду с этой гаммой цветов на глаз воздействует цвет, блнзкнй к белому. В этом случае под влняннем белого цвета уменьшается чувствнтельность рецептора, воспрнннмающего цвет наблюдаемой поверхностн с нанбольшей мощностью нзлучення и увелнчнвается чувствнтельность рецептора, воспрнннмающего цвета с нанменьшей мощностью. В результате зрнтельный аппарат наблюдателя получает прнмерно одннаковые возбуждення от всех спектральных составляющнх нзлучення при наблюденнн цветной поверхности, как прн наблюденнн белой.

Константность цвета состонт в том, что воспрнятне цвета известных нам предметов не нзменяется прн измененнн в некоторых пределах спектрального состава нсточннка нх освещення (напрнмер, белая бумага, освещенная желтым светом, остается белой. То же — цвет кожи человека, являющнйся важнейшим, но весьма сложным цветом).

1.7. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ

Энергетические характеристики лучистой энергии. Для оценкн энергетнческнх характернстнк лучнстой энергнн прнменяют интегральные н спектральные параметры [14]. Первые определяются спектром конечным ширнны, а вторые являются функцнямн длнны волны. Рассмотрнм их отдельно.

Интегральные параметры:

1) *Энергия излучения* (лучнстая энергня) Q_e, т. е. энергня, переноснмая нзлученнем, нзмеряемая в джоулях (Дж);

2) *поток лучистой энергии* (лучистый поток, поток излучения) P (или Φ_e), т. е. мощность этой энергии, проходящей через данную поверхность (измеряется в ваттах): $P = d\,Q_e/dt$;

3) *энергетическая светимость* (светность) M_e, т. е. мощность излучения $P_{\text{излуч}}$ с единицы площади поверхности излучателя (измеряется в ваттах на квадратный метр) (Вт · м$^{-2}$). Для элемента поверхности dS имеем $M_e = dP_{\text{излуч}}/dS$;

4) *поверхностная плотность облучения* (иррадиация, энергетическая освещенность, облученность) E_e, т. е. лучистая мощность $P_{\text{пад}}$, падающая на единицу площади поверхности (измеряется в ваттах на квадратный метр). Для элемента поверхности dS имеем $E_e = dP_{\text{пад}}/dS$. Для поверхностей конечных размеров энергетическая светимость и поверхностная плотность облучения, Вт/м^2:

$$M_e = P_{\text{излуч}}/S, \quad E_e = P_{\text{пад}}/S, \tag{1.2}$$

где S — излучающая или облучаемая площадь, м^2;

5) *сила излучения* (энергетическая сила света) I_e — это лучистый поток в данном направлении в единице телесного угла; измеряется в ваттах на стерадиан (Вт/ср) $I_e = d\Phi_e/d\omega = dP/d\,\omega$, где ω — телесный угол, ср;

6) *энергетическая яркость излучения* (радиация) L_e — с поверхности S, Вт/ (ср · м^2) — это сила излучения I_e, Вт/ст с поверхности S в данном направлении ОА, отнесенная к единице площади S', где S' — проекция поверхности S на плоскость, перпендикулярную к направлению излучения (наблюдения) ОА.

Силу излучения и энергетическую яркость излучения применяют для оценки распределения лучистой энергии в пространстве.

$$I_e = P/\omega; \quad L_e = I_e/S' = P/(\omega S'). \tag{1.3}$$

Спектральные параметры. Для оценки зависимости лучистой энергии от длины волны применяются спектральные параметры, являющиеся функциями длины волны λ.

Спектральная плотность лучистой мощности, Вт/нм,

$$P_\lambda = dP/d\lambda; \quad dP = P_\lambda d\lambda, \text{ Вт}; \tag{1.4}$$

спектральная светимость излучения, Вт/ (м^2 · нм),

$$M_{e\lambda} = dM_e/d\lambda = P_{\lambda\text{излуч}}/S = dP_{\text{излуч}}/(S d\lambda);$$

спектральная плотность облучения, Вт/ (м^2 · нм),

$$E_{e\lambda} = dE_e/d\lambda = P_{\lambda\text{пад}}/S = dP_{\text{пад}}/(S d\lambda); \tag{1.5}$$

спектральная сила излучения, Вт/ (ср · нм),

$$I_{e\lambda} = dI_e/d\lambda = P_\lambda/\omega = dP/(\omega d\lambda);$$

спектральная яркость излучения, Вт/ (ср · м^2 · нм),

$$L_{e\lambda} = dL_e/d\lambda = P_\lambda/(\omega S') = dP/(\omega S'\, d\lambda),$$

где dP — лучистый поток монохроматического излучения, Вт; $d\lambda$ — ширина его спектра, им.

Кривые, представляющие завнсимости P_λ, $M_{e\lambda}$, $E_{e\lambda}$, $I_{e\lambda}$, $L_{e\lambda}$, $E_{e\lambda}$ от λ, называются *спектрорадиометрическими*. Из (1.4) н (1.5) следует, что для ширины спектра $\lambda_1 \ldots \lambda_2$

$$P = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} dP = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_\lambda \, d\lambda; \quad M_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{e\lambda} \, d\lambda;$$

$$E_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e\lambda} \, d\lambda; \quad I_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{e\lambda} \, d\lambda;$$

$$L_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{e\lambda} \, d\lambda. \tag{1.6}$$

Энергетический световой поток Φ_e — это лучнстый поток, оцениваемый зрением стандартного наблюдателя МКО, нмеющего спектральную характеристику чувствнтельиости, равную стандартной относительной видности v_λ. Таким образом, монохроматический поток лучистой энергии dP с длнной волны λ и шириной спектра $d\lambda$ создает энергетический световой поток, светоВт

$$d\Phi_V = v_\lambda \, dP = v_\lambda P_\lambda \, d\lambda. \tag{1.7}$$

Понятне *световатта* в настоящее время вышло нз употребления в фотометрии. Однако в колорнметрнн весьма удобно световой поток измерять в световаттах (светоВт), т. е. в ваттах, умноженных на v_λ (из (1.7) следует, что относнтельная вндность v_λ является множителем для перехода от энергетическнх величнн в ваттах к фотометрнческнм в световаттах).

Еслн лучнстая энергия нмеет шнрину спектра $\lambda_1 \ldots \lambda_2$, то она создает энергетическнй световой поток, определяемый из (1.7):

$$\Phi_V = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\Phi_V = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v_\lambda \, dP = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v_\lambda P_\lambda \, d\lambda. \tag{1.8}$$

Фотометрические характеристики светового потока. Основной фотометрической величиной в системе СИ принята *сила света* I, равная одной *канделе* (кд). Эталон силы света создает в телесном угле один стерадиан световой поток F (или Ф), равный одному *люмену* (лм). Сила света завнсит от направлення излучения (наблюденя). Светящаяся поверхность площадью 1 м^2, создающая снлу света $I = 1$ кд в направлении, перпендикулярном к ней, имеет яркость $L = 1$ кд/м^2.

Светящаяся поверхность, излучающая световой поток $F = 1$ лм с площади $S = 1$ м^2, имеет *светимость* $M = 1$ лм/м^2. Если световой поток в 1 лм падает на поверхность площадью $S = 1$ м^2, то на ней создается освещенность $E = 1$ лк (люкс).

Для светимости, лм/м², освещенности E, лк, силы света, кд, яркости, кд/м² справедливы следующие выражения, аналогичные (1.2) и (1.3):

$$M = F/S, \quad E = F_{пад}/S,$$
$$I = F/\omega, \quad L = F/\omega S' = I/S', \tag{1.9}$$

где F — излучаемый световой поток, лм; ω — телесный угол в стерадианах (ср); S и S' — площади, м²; $F_{пад}$ — падающий (облучающий поверхность) световой поток, лм.

Для перехода от энергетических значений светового потока, измеряемых в световаттах, к фотометрическим, измеряемых в люменах, применяется коэффициент перехода — *световая эффективность* излучения K.

Экспериментально найдено, что независимо от длины волны световая эффективность, лм/светоВт,

$$K = 683. \tag{1.10}$$

На волне λ имеем $K_\lambda = F_\lambda/\Phi_{V\lambda}$. На волне $\lambda = 555$ нм $K = K_{макс} = 683$ лм/Вт. Тогда справедливо для монохроматического светового потока dF, лм, при его значении $d\Phi_V$, светоВт,

$$dF = K d\Phi_V = K v_\lambda dP = K v_\lambda P_\lambda d\lambda. \tag{1.11}$$

На $\lambda = 555$ нм $v_\lambda = 1$ и поток лучистой энергии $dP = 1$ Вт дает световой поток $dF = 683$ лм желто-зеленого цвета.

Пример. Для монохроматического излучения на волне 640 нм мощностью $dP = 10$ Вт имеем $v_\lambda = 0{,}175$ и из (1.7) и (1.10) получим $d\Phi_V = v_\lambda dP = 0{,}175 \times 10 = 1{,}75$ светоВт; $dF = K\Phi_V = 683 \cdot 1{,}75 = 1200$ лм. Монохроматическое излучение с такой же мощностью $dP = 10$ Вт, но на другой волне создает другие значения световых потоков $d\Phi_V$ и dF, например на $\lambda = 440$ нм имеем $v_\lambda = 0{,}023$, откуда получим $d\Phi_V = 0{,}023 \cdot 10 = 0{,}23$ светоВт; $dF = 683 \cdot 0{,}23 = 157$ лм вместо 1200 лм на $\lambda = 640$ нм.

Для монохроматического света справедливы следующие выражения для светимости, лм/м², освещенности, лк, силы света, кд, яркости, кд/м², соответственно:

$$dM = dF/S = K v_\lambda dP/S = K v_\lambda M_{e\lambda} d\lambda,$$
$$dE = dF_{пад}/S = K v_\lambda dP_{пад}/S = K v_\lambda E_{e\lambda} d\lambda,$$
$$dI = dF/\omega = K v_\lambda dP/d\omega = K v_\lambda I_{e\lambda} d\lambda,$$
$$dL = dF/(\omega S') = K v_\lambda dP/(\omega S') = K v_\lambda L_{e\lambda} d\lambda. \tag{1.12}$$

Если ширина спектра $\lambda_1 \ldots \lambda_2$, то из (1.11) и (1.12) имеем для светового потока, лм; светимости, лм/м²; освещенности, лк; силы света, кд; яркости, кд/м², соответственно:

$$F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} dF = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\Phi_V = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v_x dP = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v_\lambda P_\lambda d\lambda;$$

$$M = K\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v_\lambda M_{e\lambda}\, d\lambda; \quad E = K\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v_\lambda E_{e\lambda}\, d\lambda;$$

$$I = K\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v_\lambda I_{e\lambda}\, d\lambda; \quad L = K\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v_\lambda L_{e\lambda}\, d\lambda. \qquad (1.13)$$

В табл. 1.3 приведены обозначения рассмотренных выше энергетических и фотометрических (световых) характеристик лучистой энергии и их единицы измерения.

Таблица 1.3

Энергетическая характеристика		Фотометрическая характеристика	
Величина и обозначение	Единица измерения	Величина и обозначение	Единица измерения
Лучистый поток, P, Φ_e	ватт (Вт)	Световой поток, F	люмен (лм)
Энергетическая светимость, M_e	ватт/м², (Вт/м²)	Светимость, M	люмен/м² (лм/м²)
Поверхностная плотность облучения (энергетическая освещенность) E_e	ватт/м², (Вт/м²)	Освещенность, E	люкс (лк)
Сила излучения (энергетическая сила света), I_e	ватт/стерадиан (Вт/ср)	Сила света, I	кандела (кд)
Энергетическая яркость излучения, L_e	ватт/(м²·стерадиан), [Вт/(м²·ср)]	Яркость, L	кандела/м² (кд/м²),

Для оценки значения светового потока, воздействующего на глаз, в литературе применяется единица, называемая *троланд*. Если глаз смотрит на поверхность с равномерной яркостью, число тролландов равно произведению площади зрачка в квадратных миллиметрах на яркость этой поверхности, измеренной в канделах на квадратный метр. Если это произведение умножить на коэффициент потерь света 0,5 (для зрачка диаметром 8 мм), то результат будет измеряться в *приведенных тролландах*. При коэффициенте потерь в один троланд создает на сетчатке глаза освещенность около $2 \cdot 10^{-3}$ лк.

1.8. ОТРАЖЕНИЕ И ПРОПУСКАНИЕ СВЕТОВОГО ПОТОКА

Для характеристики отражающих свойств поверхности на различных длинах волн используется понятие *спектрального коэффициента отражения поверхности* на длине волны λ:

$$\rho_\lambda = \Phi_{v\lambda o}/\Phi_{v\lambda n} = v_\lambda P_{\lambda o}/v_\lambda P_{\lambda n} = P_{\lambda o}/P_{\lambda n}, \qquad (1.14)$$

где $\Phi_{v\lambda o}$ и $P_{\lambda o}$ — отраженные, а $\Phi_{v\lambda n}$ и $P_{\lambda n}$ — падающие энергетические световые и лучистые потоки на длине волны λ.

Аналогично для характеристики пропускающих свойств полупрозрачных тел используется понятие *спектрального коэффициента пропускания* на длине волны λ:

$$\tau_\lambda = \Phi_{V\lambda в}/\Phi_{V\lambda п} = v_\lambda P_{\lambda в}/v_\lambda P_{\lambda п} = P_{\lambda в}/P_{\lambda п}, \quad (1.15)$$

где $\Phi_{V\lambda в}$ и $P_{\lambda в}$ — пропущенные телом (т. е. выходящие из него) энергетический световой и лучистый потоки на длине волны λ.

Для оценки суммарного светового потока, отраженного или пропущенного телом и состоящего из ряда спектральных составляющих, используют понятия *коэффициента отражения и коэффициента пропускания* соответственно:

$$\rho = \Phi_{Vо}/\Phi_{Vп} = P_о/P_п, \quad \tau = \Phi_{Vв}/\Phi_{Vп} = P_в/P_п, \quad (1.16)$$

где $\Phi_{V_о}$ и $P_о$ — суммарные отраженные; $\Phi_{Vи,п}$ и $P_{в,п}$ — вошедшие, пропущенные энергетический световой и лучистый потоки.

Для матовой поверхности ρ называют *альбедо*. Оптическая плотность

$$D = -\lg \rho \quad \text{или} \quad D = -\lg \tau. \quad (1.17)$$

При $\tau = 0$ $D = \infty$; при $\tau = 1$ $D = 0$. Отсюда следует

$$10^{-D} = \rho \quad \text{или} \quad 10^{-D} = \tau. \quad (1.18)$$

В табл. 1.4 даны некоторые значения τ и D.

Таблица 1.4

τ	D	τ	D	τ	D
1	0	0,3981	0,40	0,1585	0,80
0,8913	0,05	0,3548	0,45	0,1413	0,85
0,7943	0,10	0,3162	0,50	0,1259	0,90
0,7079	0,15	0,2818	0,55	0,1122	0,95
0,6310	0,20	0,2512	0,60	0,1000	1,00
0,5623	0,25	0,2239	0,65	0,0100	2,00
0,5012	0,30	0,1995	0,70	0,0010	3,00
0,4467	0,35	0,1778	0,75	0,0001	4,00

В табл. 1.5 приведены множители для перехода от одних единиц яркости к другим.

Если известна спектрорадиометрическая кривая, то можно найти соответствующую ей фотометрическую величину. Например, если дана кривая $E_{e\lambda} = f(\lambda)$, то можно найти освещенность E поверхности, на которой создается $E_{e\lambda}$. Для этого нужно в соответствии с (1.13) составить таблицу произведений $v_\lambda E_{e\lambda}$ через 0,01 нм, беря $E_{e\lambda}$, Вт/ (м² · нм). Сумма этих произведений должна быть разделена на 100, так как интервал для λ равен 0,01 нм, а не 1 нм. Эта сумма равна E, светоВт/м². Перемножая $E \cdot K$, где $K = 683$, получим E, лк.

В табл. 1.6 приведены множители перевода для различных единиц освещенности.

Таблица 1.5

Яркость	Стильб	Миллистильб	Апостильб (радлюкс)	Ламберт	Миллиламберт	Футламберт	Свеча с квадратного дюйма	Свеча с квадратного метра (нит), кд/м²
Стильб (сб)	1	1000	31420	3,142	3142	2919	6,452	10000
Миллистильб (мсб)	0,001	1	31,42	0,003142	3,142	2,919	0,006452	10
Свеча с квадратного метра (кд/м²)	0,0001	0,1	3,142	0,0003142	0,3142	0,2919	0,0006452	1
Децимиллистильб (дмсб), нит (нт)	0,00003183	0,03183	1	0,0001	0,1	0,09290	0,0002054	0,3183
Апостильб (асб), радлюкс (рлк)	0,3183	318,3	10000	1	1000	929	2,054	3183
Ламберт (ламб)	0,0003183	0,3183	10	0,001	1	0,929	0,002054	3,183
Миллиламберт (мламб)	0,0003426	0,3426	10,76	0,001076	1,076	1	0,00221	3,426
Футламберт (фламб)	0,1550	155	4869	0,4869	486,9	452,4	1	1550
Свеча с квадратного дюйма (кд/дюйм²)								

Примечания: 1. стильб (сб) = 1 свеча/см²;
1 ламберт (ламб) = 1/π люмен/(см²·ср);
1 футламберт (фламб) = 1/π люмен/(ф²·ср);
1 люмен (лм) = 1/683 светового потока, создаваемого лучистым потоком, мощностью 1 Вт на волне 555 нм;
1 люкс (лк) = 1 лм/м²
1 кандела (кд), 1 свеча = 1 лм внутри телесного угла в одном стерадиане (ср); 1 нит = 1 кд/м².

Таблица 1.6

Освещенность	Люкс	Фот	Миллифот	Футсвеча	Люмен на единицу площади
Люкс (лк)	1	0,0001	0,1	0,0929	1 лм/м²
Фот (ф)	10000	1	1000	929	1 лм/см²
Футсвеча (ф·кд)	10.764	0,001076	1,076	1	1 лм/ф²
Миллифот (мФ)	10	0,001	1	0,929	0,001 лм/кв. см

Примечание. 1 фн (фотон) — единица освещенности сетчатки глаза при наблюдении поверхности с яркостью 1 кг/м² и площади зрачка 1 мм².

Глава 2
ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КОЛОРИМЕТРИИ

2.1. АДДИТИВНОЕ СМЕШЕНИЕ ЦВЕТОВ И ОСНОВНЫЕ ЦВЕТА АДДИТИВНОЙ СМЕСИ. СОГЛАСОВАНИЕ ЦВЕТОВ

Общие положения. Колорнметрня является наукой, в которой рассматрнваются вопросы колнчественного определения цвета н нзмерення его пснхофнзнческих характернстнк на основе спектральной чувствнтельностн зрення стандартного наблюдателя МКО (т. е. прнемнпка излучення, спектральная чувствнтельность которого равна v_λ). Колорнметрня как наука начала актнвно развнваться с 1920 г. [88—91]. Основные положення колорнметрни были развнты н стандартнзнрованы МКО в 1931 г. [90—95, 15]. Общепрннятая термнпологня по колорнметрнн прнводнтся в [12—14, 87].

Сложение цветов. Смесь нескольких световых потоков называется *аддитивной* нлн слагательной (additio — по латынн «сложение») в отличие от *субтрактивной* нлн вычитательной смесн (вычнтается нз спектра светового потока часть спектральных составляющих). На рнс. 2.1*, *а* показана схема аддитнвного сложення световых потоков на экране (*1* — экран; *2...4* — красный, зеленый и снннй светофильтры; *Б*, *Ж*, *П*, *Г* — белый, желтый, пурпурный, голубой цвета). Аддитивная смесь красного, зеленого и синего цветов, в зависимости от пропорцнй нх яркостей, дает цвета, указанные в табл. 2.1.

Таблнца 2.1

Смешиваемые цвета	Цвет смеси	Смешиваемые цвета	Цвет смеси
Красный н зеленый	Желтый	Синнй и зеленый	Голубой
Красиый н синнй	Пурпурный	Красный зеленый и снннй	Белый

На рнс. 2.2* показаны варианты сложення цветов.

Аддитнвное смешенне цветов нсследовалось И. Ньютоном, который в 1669 г. впервые сформулировал ряд положеннй учення о цвете.

Исходя нз трехкомпонентной теорин цветового зрения, немецкнй математнк Х. Грассман в 1853 г. установил, что для однозначного определения любого цвета *Ц* необходимо н достаточно нметь три основных (первичных) цвета, выбранных так, что в результате их аддитнвной смесн в соответствующих пропорциях по яркости может быть получен цвет, эквнвалентный данному цвету *Ц* (смысл эквивалентностн поясняется ннже при рассмотрении вопроса о согласованнн цветов).

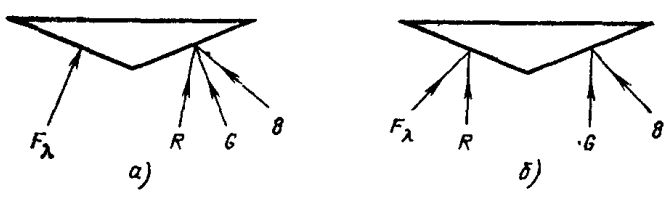


Рис. 2.3. Согласование цветов:
а — цвет F_λ ие более насыщенный, чем смесь цветов $R+G+B$; *б* — цвет F_λ более насыщенный, чем смесь цветов $R+G+B$

Основные цвета должны быть *взаимонезависимыми*, т. е. аддитивная смесь двух из них ни при каких условиях не должна давать третий основной цвет. Поясним это. Пусть три основных цвета изображаются точками на некоторой поверхности. Эти точки можно представить как концы трех векторов, исходящих из общего начала координат, находящегося в некоторой точке пространства. Условие взаимной независимости трех векторов означает, что они не должны лежать в одной плоскости, т. е. объем построенного на них параллелепипеда не должен быть равен нулю. Существует множество взаимонезависимых комбинаций трех основных цветов.

Примером взаимонезависимых цветов являются красный, зеленый и синий цвета. Их принято обозначать латинскими буквами R (красный), G (зеленый), B (синий).

Согласование цветов. Если на одну грань матовой стеклянной призмы направить изучаемый световой поток F_λ, а на другую световые потоки трех основных цветов R, G, B (такая призма является простейшим фотометром), как показано на рис. 2.3, *а*, то можно так подобрать яркости основных цветов, что наблюдатель, видя одновременно цвета на обеих гранях призмы, оценит их как одинаковые (*согласованные*) по яркости и цветности (независимо от их спектров). Процесс достижения этого условия называется *психофизическим согласованием цветов*. При этом мощности излучений, падающих на обе грани призмы, могут быть различны.

Смесь двух или трех основных цветов (даже если это основные спектральные цвета) дает цвет менее насыщенный, чем спектральные цвета, а согласовать такую смесь со спектральным (монохроматическим) цветом, как было описано выше, невозможно, поэтому вводится понятие *колориметрического согласования цветов*: если на одной грани (например, левой) фотометра имеется спектральный цвет, то необходимо добавить на нее один или два основных цвета (рис. 2.3, *б*), так чтобы цвет смеси стал менее насыщенным, чем спектральный цвет (смесь двух или трех спектральных цветов дает цвет, менее насыщенный, чем спектральные цвета). Этот цвет согласуется психофизически с цветом на второй (правой) грани, созданным оставшимися на ней основными цветами. В этом случае можно считать, что на правой грани имеется смесь трех основных цветов, но в эту смесь входят с отрицательным знаком те основные цвета, которые добавляются к цвету на левой грани.

Итак, три основных цвета позволяют получить колориметрическое согласование с любым цветом и только с помощью одной комбинации

данных основных цветов. Для сложных цветов, являющихся смесью нескольких составляющих цветов, колориметрическое согласование с цветом смеси можно получить, только когда каждый из этих составляющих цветов в отдельности может быть согласован смесью данных основных цветов. Опыт показывает, что колориметрическое согласование цветов сохраняется в широком диапазоне их яркостей.

2.2. СПОСОБЫ АДДИТИВНОГО СМЕШЕНИЯ ЦВЕТОВ

До сих пор мы рассматривали *одновременное смешение цветов*, т.е. световые потоки смешиваемых цветов наблюдатель видел одновременно. Возможно *поочередное смешение цветов*, когда световые потоки смешиваемых цветов воздействуют на глаз наблюдателя поочередно, а не одновременно. При достаточно высокой частоте следования этих потоков создается такое же впечатление от цвета смеси, как и при одновременном смешении. Можно также получить *пространственное смешение цветов*, если наблюдаемая поверхность покрывается мелкими разноцветными пятнами или полосками (мозаика) и с некоторого расстояния кажется не пестрой, а имеющей однородный цвет смеси отдельных пятен, так как в зрительном аппарате наблюдателя сливаются ощущения от цветов мелких изображений. Пространственное смешение цветов применяется в живописи (пуантелизм), текстильной промышленности, цветном телевидении. Законы такого смешения, как показали в 1935 г. советские ученые Б. М. Теплов и С. П. Яковлев, не отличаются от таковых для других способов аддитивного смешения [5].

Известно еще *бинокулярное смешение цветов*, когда на один глаз наблюдателя воздействует световой поток одного цвета, а на другой — другого, и в зрительном аппарате возникает ощущение цвета их смеси. Русский ученый А. В. Ходин в 1876 г. показал, что бинокулярное смешение цветов дает устойчивый цвет [5]. Оно применяется в стереоцветных кино и телевидении.

2.3. ЗАКОНЫ АДДИТИВНОГО СМЕШЕНИЯ ЦВЕТОВ

Первый закон Грассмана[1]. Для всякого цвета имеется дополнительный цвет, в смеси с которым (в определенной пропорции яркостей) данный цвет дает ахроматический (серый) световой поток. На рис. 2.4 показан цветовой круг Ньютона, в центр которого помещен белый цвет $Б$. Для спектрального цвета $Ц$ дополнительным является спектральный цвет $Ц_с$, т. е. $Ц + Ц_с = Б$, где знак плюс означает смесь световых потоков цветов $Ц$ и $Ц_с$. Неспектральные цвета также имеют дополнительные цвета, например $Ц_1 + Ц_2 = Б$, где $Ц_1$ и $Ц_2$ — взаимодополнительные цвета.

[1] Сформулировал в 1853 г. Х. Грассман, изучая цветовой круг Ньютона [88].

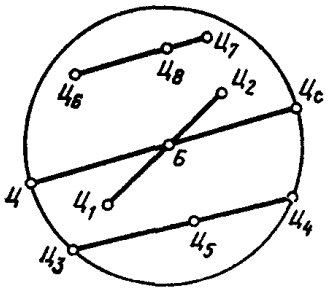


Рис. 2.4. Сложение цветов в круге И. Ньютона

Второй закон Грассмана. Если смешивать два спектральных цвета, представленных точками в цветовом круге Ньютона, то получаемый цвет смесн будет представлен точкой, которая находнтся между смешнваемымн цветамн на прямой, соединяющей нх. На рис. 2.4 показан цвет $Ц_5$, являющийся смесью спектральных цветов $Ц_3$ н $Ц_4$ (т. е. $Ц_3 + Ц_4 = Ц_5$), и цвет $Ц_8$, являющнйся смесью неспектральных цветов $Ц_6$ и $Ц_7$ (т. е. $Ц_6 + Ц_7 = Ц_8$).

Третий закон Грассмана. Смесь цветов, одинаковых по создаваемому ими в отдельности визуальному (зрнтельному) ощущению, создает такое же визуальное ощущение, как и смешиваемые цвета в отдельности, независнмо от их спектрального состава. Из этого закона следуют выводы:

1. Цвет смеси нескольких излучений определяется цветами этих излучений, а не нх спектральнымн составами, хотя нзмененне спектра излучения может вызвать изменение его цвета.

2. Если цвет $Ц_1$ согласован с $Ц_2$ и цвет $Ц_3$ согласован с $Ц_4$, то смесь цветов $Ц_1$ и $Ц_2$ даст цвет $Ц_1$ (можно также утверждать, что смесь цветов $Ц_1$ и $Ц_2$ дает цвет $Ц_2$), а смесь $Ц_1$ и $Ц_3$ согласуется с цветом смеси $Ц_2$ и $Ц_4$. Это можно записать *цветовыми тождествами*:

$$\text{если } Ц_1 \equiv Ц_2,\ Ц_3 \equiv Ц_4, \tag{2.1}$$

$$\text{то } Ц_1 + Ц_2 \equiv Ц_1;\ Ц_1 + Ц_2 \equiv Ц_2;\ Ц_3 + Ц_4 \equiv Ц_3;\ Ц_3 + Ц_4 \equiv Ц_4. \tag{2.2}$$

В этом случае

$$Ц_1 + Ц_3 \equiv Ц_2 + Ц_4,\ \kappa_1 Ц_1 \equiv \kappa_1 Ц_2;\ \kappa_2 Ц_3 \equiv \kappa_2 Ц_4, \tag{2.3), (2.4}$$

где κ_1 и κ_2 — постоянные числа, если спектры излучений не изменяются при умножении на κ_1 и κ_2.

В этих тождествах спектры нзлучений с цветами $Ц_1$, $Ц_2$, $Ц_1 + Ц_2$ могут быть различнымн; то же — спектры излучений $Ц_3$, $Ц_4$, $Ц_1 + Ц_3$, $Ц_2 + Ц_4$. Обозначим основные цвета R (красный), G (зеленый) и B (синий). Колнчества основных цветов (т. е. их световые потоки или их яркости, или создаваемые имн освещенности на поверхности), принятые за условные единицы, обозначим (R), (G), (B), а колнчества этих единиц, образующие в смеси данный цвет $Ц$ — R, G, B. Тогда цвета $Ц_1$ и $Ц_2$ можно представить цветовыми тождествами:

$$Ц_1 \equiv R_1(R) + G_1(G) + B_1(B),\ Ц_2 \equiv R_2(R) + G_2(G) + B_2(B), \tag{2.5}$$

а цвет нх смеси

$$Ц_1 + Ц_2 \equiv (R_1 + R_2)(R) + (G_1 + G_2)(G) + (B_1 + B_2)(B). \tag{2.6}$$

2.4. ТРЕХЦВЕТНАЯ (ТРИХРОМАТИЧЕСКАЯ) КОЛОРИМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦВЕТА

Общие положения. Спектрораднометрнческне кривые (распределение мощности по спектру) не определяют непосредственно цветность излучення, и по ним трудно судить о цвете смеси нескольких цветов. Цвет $Ц$ был определен выше тождеством (2.5), т. е. пропорциями основных цветов в представляющей его смеси. Тождество (2.5) позволяет: однозначно количественно определять (опнсывать) любой цвет и разлнчне в цветах не одннаковых по цветности световых потоков, а также рассчнтывать цвета аддитивной смеси нескольких световых потоков. Еслн прн колорнметрнческом согласованнн цвета $Ц$ смесью трех основных цветов R, G, B эти основные цвета берутся в количествах R, G, B, прнчем единнчные количества их равны (R), (G), (B), то вместо тождества (2.5) колориметрическое согласование цветов может быть записано в виде *цветового уравнения*:

$$Ц = R(R) + G(G) + B(B), \tag{2.7}$$

где множители R, G, B, стоящие перед скобкамн, называются *координатами цвета* цвета $Ц$ (*количества трех стимулов*) в снстеме основных цветов RGB. В (2.7) координаты цвета R, G, B входят со своими знаками (плюс нли мннус).

Обозначим $L_{(R)}$, $L_{(G)}$, $L_{(B)}$ — яркости едннчных количеств основных цветов (R), (G), (B), а L_R, L_G, L_B — яркости количеств R, G, B основных цветов в смеси, образующей данный цвет $Ц$, яркость которого обозначим $L_Ц$. Тогда нмеем

$$L_Ц = L_R + L_G + L_B; \tag{2.8}$$

и координнаты цвета цвета $Ц$:

$$R = L_R/L_{(R)};\ G = L_G/L_{(G)};\ B = L_B/L_{(B)}, \tag{2.9}$$

т. е. координаты цвета — относительные велнчины. Знать абсолютные значения яркостей (в кд/м^2) $L_{(R)}$, $L_{(G)}$, $L_{(B)}$ нет необходимости, достаточно знать относительные их значения, для чего выбнрают некоторый *опорный цвет*, например белый, который обозначим буквой $Б$. Абсолютные значения яркостей $L_{(R)}$, $L_{(G)}$, $L_{(B)}$ в смеси основных цветов, R, G, B зрительно эквивалентной белому цвету $Б$ с яркостью (в кд/м^2) $L_Б = L_{(R)} + L_{(G)} + L_{(B)}$, примем за яркости единичных количеств этих основных цветов. Тогда относительные яркости основных цветов в этой смеси (отнесенные, например, к яркости $L_{(R)}$), обозначим $L'_{(R)}$, $L'_{(G)}$, $L'_{(B)}$ и получим

$$L'_{(R)} = L_{(R)}/L_{(R)} = 1;\ L'_{(G)} = L_{(G)}/L_{(R)};\ L'_{(B)} = L_{(B)}/L_{(R)}. \tag{2.10}$$

Подставив $L_{(R)}$, $L_{(G)}$, $L_{(B)}$ из (2.10) в (2.9), получим

$$R = \frac{L_R}{L'_{(R)}L_{(R)}};\quad G = \frac{L_G}{L'_{(G)}L_{(R)}};\quad B = \frac{L_B}{L'_{(B)}L_{(R)}}. \tag{2.11}$$

Из (2.11) следует отношение координат цвета

$$R:G:B=\frac{L_R}{L'_{(R)}L_{(R)}}:\frac{L_G}{L'_G L_{(R)}}:\frac{L_B}{L'_{(B)}L_{(R)}}.$$

Умножив на $L_{(R)}$ все члены правой части, отчего это отношение не изменится, получим

$$R:G:B=L_R/L'_{(R)}:L_G/L'_{(G)}:L_B/L'_{(B)}, \qquad (2.12)$$

так как $L_{(R)}$ при умножении сокращается. Следовательно, можно координаты цвета R, G, B цвета $Ц$ определить не из (2.9), а из (2.12), полагая

$$R=L_R/L'_{(R)};\quad G=L_G/L'_{(G)};\quad B=L_B/L'_{(B)}. \qquad (2.13)$$

Выражение (2.13) удобнее, чем (2.9), так как для него надо знать значения не абсолютных яркостей $L_{(R)}$, $L_{(G)}$, $L_{(B)}$, а относительных $L'_{(R)}$, $L'_{(G)}$, $L'_{(B)}$, которые известны (определяются экспериментально для заданного белого цвета $Б$ и не зависят от его яркости (будут даны ниже)).

Уравнение (2.7) справедливо и для колориметрического согласования, когда один или два основных цвета добавляются к цвету $Ц$ для снижения его насыщенности, что, например, можно записать в виде уравнения:

$$Ц+R(R)=G(G)+B(B), \qquad (2.14)$$

откуда следует

$$Ц=-R(R)+G(G)+B(B). \qquad (2.15)$$

Обычно знак «минус» в правой части (2.15) не пишется, но если координата цвета получается в правой части отрицательной, то это означает, что соответствующий ей основной цвет переносится на левую грань фотометра (см. рис. 2.3), где он складывается с цветом $Ц$.

Количество цвета $Ц$, выраженное в единицах основных цветов, называется *цветовым модулем цвета* $Ц$

$$m=R+G+B. \qquad (2.16)$$

Здесь и далее координаты цвета R, G, B следует брать с их знаками.

Если $(Ц)$ — единичное количество цвета $Ц$ в системе основных цветов RGB, то количество этого цвета в этой системе:

$$Ц=m(Ц), \qquad (2.17)$$

откуда (2.7) может быть записано в виде

$$m(Ц)=R(R)+G(G)+B(B). \qquad (2.18)$$

Система количественного определения цвета с помощью (2.7) называется *трихроматической* (*трехцветной*).

Единичные количества цветов $(Ц)$, (R), (G), (B) являются *трихроматическими единицами цветов*. Их обозначают буквой T. Это относи-

тельные велнчины. Абсолютные значення велнчнны T для каждого основного цвета определяются абсолютным колнчеством этого цвета н условнямн его выбора (т. е. его световым потоком, яркостью, освещенностью н т. д.). Онн различны для разных цветов.

Колнчество цвета $Ц$ в трнхроматнческнх еднннцах равно его модулю m. Цвет, для которого координаты цвета одннаковы, т. е. $R = G = B$, называется *равностимульным* и обозначается $Ц_р$. Его модуль обозначнм $m_р$. Для этого цвета нмеем нз (2.16) н (2.7) $m_р = R + G + B = 3R = 3G = 3B$, откуда

$$R = G = B = m_р/3; \tag{2.19}$$

$$Ц_р = \frac{m_р}{3}(R) + \frac{m_р}{3}(G) + \frac{m_р}{3}(B) = \frac{m_р}{3}[(R) + (G) + (B)]. \tag{2.20}$$

Еслн $R = G = B = 1T$, то

$$m_р = 3T. \tag{2.21}$$

Единичное уравнение цветности. Цветовое уравнение для одной трнхроматнческой еднннцы цвета $Ц$ в снстеме основных цветов RGB можно получнть, разделнв обе частн (2.7) на m:

$$(Ц) = \frac{R}{m}(R) + \frac{G}{m}(G) + \frac{B}{m}(B). \tag{2.22}$$

Обозначнв

$$r = \frac{R}{m} = \frac{R}{R+G+B}; \quad g = \frac{G}{m} = \frac{G}{R+G+B},$$

$$b = \frac{B}{m} = \frac{B}{R+G+B}. \tag{2.23}$$

где R, G, B н m с их знакамн (плюс нлн мннус). Получнм

$$(Ц) = r(R) + g(G) + b(B). \tag{2.24}$$

Из (2.23) следует, что $r + g + b = (R/m) + (G/m) + (B/m) = m/m = 1$, т. е.

$$r + g + b = 1. \tag{2.25}$$

Уравненне (2.25) называется *единичным* нлн *унифицированным* н определяет цветность цвета независнмо от его яркостн. Коэффнцненты r, g, b называются *координатами цветности* н берутся с их знаками. Введенне нх в колорнметрию является очень важным, так как достаточно знать (использовать) две нз этнх координат, а третью можно найтн из (2.25), напрнмер $b = 1 - (r + g)$. Их название вполне оправдано, так как цветность цвета определяется двумя его параметрами (цветовым тоном н насыщенностью нлн преобладающей длнной волны и чистотой), а не тремя.

Пояснним на прнмере смысл (2.7).

Пусть цвет $Ц$ создается суммой количеств $R + G + B$ основных цветов, где координаты этого цвета: $R = a_1$ единиц T, $G = a_2$ единиц T, $B = a_3$ единиц T (a_1, a_2, a_3 — некоторые числа). Допустим, что единичные количества ($1T$) основных цветов (R), (G), (B) создаются световыми потоками $F_{(R)} = 2$ лм; $F_{(G)} = 5$ лм; $F_{(B)} = 7$ лм. Тогда количества основных цветов (координаты R, G, B цвета $Ц$) для согласования создаются световыми потоками $a_1F_{(R)}$, $a_2F_{(G)}$, $a_3F_{(B)}$. Если, например, $a_1 = 2$, $a_2 = 10$, $a_3 = 3$, то эти количества основных цветов создаются световыми потоками $a_1F_{(R)} = 2\times2 = 4$ лм цвета R; $a_2F_{(G)} = 10\times5 = 50$ лм цвета G и $a_3F_{(B)} = 3\times7 = 21$ лм цвета B. Цветовой модуль этого цвета $m = R + G + B = a_1 + a_2 + a_3 = 2 + 10 + 3 = 15$ единиц T, и его световой поток $F_Ц = a_1F_{(R)} + a_2F_{(G)} + a_3F_{(B)} = 4+50+21 = 75$ лм. Координаты цветности этого цвета $r = R/m = a_1/m = 2/15 = 0{,}133$; $g = G/m = a_2/m = 10/15 = 0{,}667$; $b = B/m = a_3/m = 3/15 = 0{,}2$. Относительные световые потоки основных цветов $a_1F_{(R)}/F_Ц = 4/75 = 0{,}53$ для цвета R; $a_2F_{(G)}/F_Ц = 50/75 = 0{,}668$ для цвета G; $a_3F_{(B)}/F_Ц = 21/75 = 0{,}280$ для цвета B.

Для равностимульного цвета $Ц_р$ (для него $R = G = B$) имеем из (2.19)

$$r_р = 1/3; \quad g_р = 1/3; \quad b_р = 1/3. \tag{2.26}$$

На основании (2.8) и (2.9) можем написать для яркости цвета $Ц$, кд/м^2,

$$L_Ц = RL_{(R)} + GL_{(G)} + BL_{(B)}. \tag{2.27}$$

Яркость единичного количества ($Ц$) цвета $Ц$ (т. е. единице T цвета $Ц$)

$$L_{(Ц)} = L_Ц/m = rL_{(R)} + gL_{(G)} + bL_{(B)}, \tag{2.28}$$

где $m = Ц/(Ц) = L_Ц/L_{(Ц)}$. Выражение для модуля m дано с учетом (2.21); величины $L_{(R)}$, $L_{(G)}$, $L_{(B)}$ — *абсолютные яркостные коэффициенты основных цветов* (в кд/м^2). Если выбрать некоторый цвет $Ц_0$ в качестве опорного и обозначить его яркость L_0, то можно яркости других цветов вычислять относительно L_0 и называть их *относительными яркостными коэффициентами* этих цветов. Например, обозначим

$$L''_{(R)} = L_{(R)}/L_0; \quad L''_{(G)} = L_{(G)}/L_0; \quad L''_{(B)} = L_{(B)}/L_0. \tag{2.29}$$

Тогда относительный яркостной коэффициент цвета $Ц$ (относительно L_0)

$$L''_Ц = L_Ц/L_0 = (RL_{(R)} + GL_{(G)} + BL_{(B)})/L_0 = R\frac{L_{(R)}}{L_0} + G\frac{L_{(G)}}{L_0} + B\frac{L_{(B)}}{L_0} = RL''_{(R)} + GL''_{(G)} + BL''_{(B)}. \tag{2.30}$$

Относительный яркостной коэффициент единичного количества цвета ($Ц$) получим из (2.28) и (2.29):

$$L''_{(Ц)} = \frac{L_{(Ц)}}{L_0} = \frac{rL_{(R)} + gL_{(G)} + bL_{(B)}}{L_0} = rL''_{(R)} + gL''_{(G)} + bL''_{(B)}. \tag{2.31}$$

Удельные координаты цвета спектральных цветов. Если спектральный цвет $Ц_\lambda$ имеет мощность 1 Вт, то его координаты цвета R, G, B в (2.7) называют *удельными координатами цвета* $Ц_\lambda$ и обозначают $\bar{r}$, $\bar{g}$, $\bar{b}$ (это координаты цвета, а не цветности). Тогда из (2.7) для цвета $Ц_\lambda$ с мощностью 1 Вт обозначаемого $\overline{Ц}_\lambda$, получим

$$\overline{Ц}_\lambda = \bar{r}(R) + \bar{g}(G) + \bar{b}(B). \qquad (2.32)$$

В отличие от (2.7) в (2.32) слева написано определенное значение мощности, содержащееся в цвете $\overline{Ц}_\lambda$ (т. е. 1 Вт). Поэтому очевидно, что удельные координаты цвета $\bar{r}$, $\bar{g}$, $\bar{b}$, написанные справа в (2.32), должны определяться в соответствии со значениями мощностей, содержащимися в единичных количествах основных цветов R, G, B, так как в противном случае не будет согласования по яркости и цветности цвета $Ц_\lambda$ мощностью излучения в 1 Вт со смесью основных цветов R, G, B, взятых в количествах $\bar{r}$, $\bar{g}$, $\bar{b}$.

Если единичное количество спектрального цвета ($Ц_\lambda$) создано мощностью излучения $P_{(Ц)}$, то из (2.24) получим для количества цвета, созданного мощностью излучения в 1 Вт,

$$\overline{Ц}_\lambda = \frac{(Ц_\lambda)}{P_{(Ц)}} = \frac{r}{P_{(Ц)}}(R) + \frac{g}{P_{(Ц)}}(G) + \frac{b}{P_{(Ц)}}(B). \qquad (2.33)$$

Из сравнения (2.33) с (2.32) получаем удельные координаты спектральных цветов

$$\bar{r} = r/P_{(Ц)};\ \bar{g} = g/P_{(Ц)};\ \bar{b} = b/P_{(Ц)}. \qquad (2.34)$$

По аналогии с (1.7) энергетический световой поток, создающий единичное количество спектрального цвета ($Ц_\lambda$), светоВт,

$$\Phi_{V(Ц)} = v_\lambda P_{(Ц)}. \qquad (2.35)$$

Подставив $P_{(Ц)}$ из (2.35) в (2.34), получим

$$\bar{r} = \frac{r}{\Phi_{V(Ц)}} v_\lambda;\ \bar{g} = \frac{g}{\Phi_{V(Ц)}} v_\lambda;\ \bar{b} = \frac{b}{\Phi_{V(Ц)}} v_\lambda. \qquad (2.36)$$

Для определения $\bar{r}$, $\bar{g}$, $\bar{b}$ необходимо знать модуль $\overline{m}_\lambda$ спектрального цвета $\overline{Ц}_\lambda$ мощностью излучения в 1 Вт в системе основных цветов RGB. Из (2.28) можно написать

$$\overline{m}_\lambda = \frac{\overline{Ц}_\lambda}{(Ц_\lambda)} = \frac{L_{\overline{Ц}}}{L_{(Ц)}} = \frac{L_{\overline{Ц}}}{rL_{(R)} + gL_{(G)} + bL_{(B)}}$$

$$= \frac{\Phi_{V\overline{Ц}}}{r\Phi_{V(R)} + g\Phi_{V(G)} + b\Phi_{V(B)}}. \qquad (2.37)$$

так как $L_{\overline{Ц}} = a\Phi_{V\overline{Ц}}$; $L_{(R)} = a\Phi_{V(R)}$; $L_{(G)} = a\Phi_{V(G)}$; $L_{(B)} = a\Phi_{V(B)}$, где a — постоянный коэффициент; $\Phi_{V\overline{Ц}}$, $\Phi_{V(R)}$, $\Phi_{V(G)}$, $\Phi_{V(B)}$ — энергетнческие световые потоки цвета $\overline{Ц}$ и единичных колнчеств основных цветов в световаттах. Черточка над буквами $Ц$ и m в обозначеннях указывает, что велнчины $\overline{Ц}_\lambda$, $L_{\overline{Ц}}$, $\Phi_{V(\overline{Ц})}$, $\overline{m}_\lambda$ относятся к спектральному цвету с мощностью нзлучения в 1 Вт. Справедлнвость выражения $\overline{m}_\lambda = L_{\overline{Ц}}/L_{(Ц)}$ проверяется подстановкой в него (2.27) и (2.28), что с учетом (2.23) дает (2.16). Для спектрального цвета $\overline{Ц}_\lambda$ с мощностью нзлучения $P_{\overline{Ц}}$ 1 Вт, получаем по аналогнн с (1.7)

$$\Phi_{V\overline{Ц}} = v_\lambda. \qquad (2.38)$$

Подставив (2.38) в (2.37), получим

$$\overline{m}_\lambda = v_\lambda (r\Phi_{V(R)} + g\Phi_{V(G)} + b\Phi_{V(B)}). \qquad (2.39)$$

Зная $\overline{m}_\lambda$, можно найтн удельные координаты спектрального цвета, подставив $\overline{r}, \overline{g}, \overline{b}, \overline{m}_\lambda$ в (2.23) вместо R, G, B и m:

$$\overline{r} = r\overline{m}_\lambda; \quad \overline{g} = g\overline{m}_\lambda; \quad \overline{b} = b\overline{m}_\lambda. \qquad (2.40)$$

Подставнв r, g, b из (2.40) в (2.39), получим

$$v_\lambda = \overline{r}\Phi_{V(R)} + \overline{g}\Phi_{V(G)} + \overline{b}\Phi_{V(B)} = \overline{\Phi}_{VR} + \overline{\Phi}_{VG} + \overline{\Phi}_{VB}, \qquad (2.41)$$

где $\overline{\Phi}_{VR}$, $\overline{\Phi}_{VG}$, $\overline{\Phi}_{VB}$ — энергетнческие световые потоки основных цветов в световаттах, необходнмые для согласования со спектральным цветом $\overline{Ц}_\lambda$ мощностью нзлученнн 1 Вт.

Если основные цвета спектральные, то нз (1.7) н (2.41) получнм:

$$\overline{\Phi}_{VR} = \overline{r}\Phi_{V(R)} = \overline{r}P_{(R)}v_\lambda = \overline{P}_R v_\lambda,$$

$$\overline{\Phi}_{VG} = \overline{g}\Phi_{V(G)} = \overline{g}P_{(G)}v_\lambda = \overline{P}_{(G)}v_\lambda,$$

$$\overline{\Phi}_{VB} = \overline{b}\Phi_{V(B)} = \overline{b}P_{(B)}v_\lambda = \overline{P}_B v_\lambda. \qquad (2.42)$$

Здесь $P_{(R)}$, $P_{(G)}$, $P_{(B)}$ — мощностн нзлучения единнчных колнчеств основных цветов; $\overline{P}_R$, $\overline{P}_G$, $\overline{P}_B$ — мощности излучения основных цветов, необходимые для согласованнн со спектральным цветом $\overline{Ц}_\lambda$ мощностью нзлученнн в 1 Вт.

Определение координат цвета $Ц$ по его спектральной плотности P_λ. Есл нзвестны удельные координаты $\overline{r}, \overline{g}, \overline{b}$ для всех спектральных цветов, то можно найтн коорднннаты R, G, B любого цвета $Ц$ (не спектрального), зная распределенне мощности нзлученнн P_λ в спектре этого цвета. Действнтельно, спектральная плотность мощностн нзлученнн

этого цвета P_λ (в Вт/нм) создает при ширине элементарного спектра $d\lambda$ составляющие координат цвета R, G, B цвета $Ц$:

$$dR = \bar{r}P_\lambda d\lambda;\ dG = \bar{g}P_\lambda d\lambda;\ dB = \bar{b}P_\lambda d\lambda. \qquad (2.43)$$

Координаты цвета спектра излучения в диапазоне волн $\lambda_1 \ldots \lambda_2$ в трихроматических единицах:

$$R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{r}P_\lambda d\lambda;\ G = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{g}P_\lambda d\lambda;\ B = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{b}P_\lambda d\lambda. \qquad (2.44)$$

Вместо интегрирования обычно суммируют конечные числа произведений, стоящих под знаком этих интегралов, взятых через равные интервалы $\Delta\lambda$, например через 0,01 нм. Тогда

$$R = \Delta\lambda\Sigma\bar{r}P_\lambda;\ G = \Delta\lambda\Sigma\bar{g}P_\lambda;\ B = \Delta\lambda\Sigma\bar{b}P_\lambda. \qquad (2.45)$$

Для определения координат цветности r, g, b цвета $Ц$ достаточно знать его относительную спектральную плотность мощности излучения P'_λ. Действительно, если подставить в (2.45) $P_\lambda = nP'_\lambda$, то постоянный коэффициент n можно вынести из-под знака суммы и далее, при использовании (2.27), он, как и $\Delta\lambda$, войдет в качестве множителя в числитель и знаменатель и поэтому сократится.

Если P_λ — спектральная плотность мощности излучения, падающего на поверхность тела, а ρ_λ или τ_λ — спектральные коэффициенты отражения или пропускания этого тела в соответствии с (1.14) и (1.15), то в (2.45) вместо P_λ следует подставлять произведения $\rho_\lambda P_\lambda$ или $\tau_\lambda P_\lambda$.

Зависимость от длины волны λ координат цветности r, g, b спектральных цветов изображается графическими *кривыми смешения*. Если основные цвета R, G, B существуют реально, то кривые смешения имеют для отдельных участков спектра отрицательные значения, так как сумма двух или трех основных цветов дает цвет менее насыщенный, чем спектральные цвета, о чем было сказано выше. Можно в качестве основных цветов выбрать условные, не реальные, но удобные для расчетов основные цвета, так чтобы кривые смешения во всем спектре не имели отрицательных значений. Эти кривые называются кривыми *сложения основных возбуждений*.

2.5. ЦВЕТОВОЕ ПРОСТРАНСТВО

Общие положения. Цвет — величина трехмерная (характеризуемая тремя параметрами, например, яркостью, цветовым тоном и насыщенностью) и может быть представлен точкой в пространстве трех измерений, положение которой задается тремя координатами или вектором Ц, начало которого помещается в начале координат, а конец — в данной точке пространства, представляющей цвет $Ц$. При этом длина вектора характеризует яркость цвета, направление вектора определяет цветность (цветовой тон и насыщенность) цвета. Простран-

ство, в котором находятся цветовые векторы, называется *цветовым пространством* (*цветовым телом*).

Положение цветового вектора в цветовом пространстве и его геометрическая длина не зависят от выбора основных цветов, а определяются цветностью и яркостью цвета, представленного данным вектором. Если $Ц_1$ и $Ц_2$ — цвета одинаковой цветности, но различной яркости, то $\mathbf{Ц}_2 = k\mathbf{Ц}_1$, т. е. эти два цветовых вектора имеют одинаковое направление в цветовом пространстве и отличаются только своей длиной (k— постоянный коэффициент).

Однако в отличие от обычного (евклидового) геометрического пространства единичные цветовые векторы (векторы, представляющие единичные количества цвета, т. е. имеющие *цветовую длину*, равную $1T$) могут иметь разную геометрическую длину, например в миллиметрах, так как единичные количества цветов могут иметь разную яркость, а геометрическая длина цветового вектора определяется яркостью цвета, а не его трихроматическим количеством. Отметим, что цветовой модуль цвета $Ц$ и его единичное количество ($Ц$) зависят от выбора основных цветов и от цветности цвета $Ц$ (модуль $Ц$ зависит также от яркости этого цвета).

Основные цвета, взятые в единичных количествах, могут быть представлены тремя векторами **R**, **G**, **B**, как показано на рис. 2.5; эти векторы назовем *единичными* (ортами). Их геометрические длины, как указано выше, могут быть не одинаковы и равны одной трихроматической единице T. Точка 0 здесь представляет черный цвет, так как длина вектора **Ц** в ней равна нулю и, следовательно, эта точка имеет нулевую яркость.

Так как при аддитивном смешении двух или более цветов яркость не уменьшается, то не может быть цветовых векторов противоположных направлений. Поэтому совокупность всех реальных цветовых векторов занимает в пространстве телесный угол размером меньше 2π. Чтобы быть взаимонезависимыми, векторы основных цветов должны быть некомпланарными (т. е. не должны лежать в одной плоскости).

Для цветового вектора в цветовом пространстве можно написать цветовое уравнение в векторной форме

$$\mathbf{Ц} = R\mathbf{R} + G\mathbf{G} + B\mathbf{B}. \qquad (2.46)$$

где $R\mathbf{R}$, $G\mathbf{G}$, $B\mathbf{B}$ — векторы основных цветов, взятых в количествах (трихроматических единицах) R, G, B, аддитивная смесь которых дает цвет $Ц$; множители R, G, B являются *контравариантными декартовыми координатами вектора* $Ц$, т. е. координатами, получаемыми путем проекции вектора Ц на оси координат параллельно этим осям.

Как уже говорилось, единичные векторы основных цветов **R**, **G**, **B** не должны лежать в одной плоскости (т. е. объем параллелепипеда, построенного на них, не должен быть равен нулю). Тогда сумма двух из них не может дать третий. При этом углы между векторами **R**, **G**, **B** могут быть любыми.

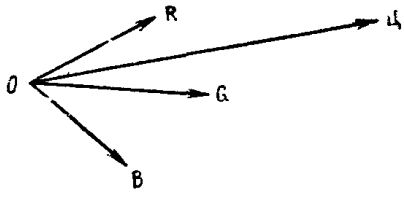


Рис. 2.5. Единичные векторы **R**, **G**, **B** в цветовом пространстве (длины векторов разные)

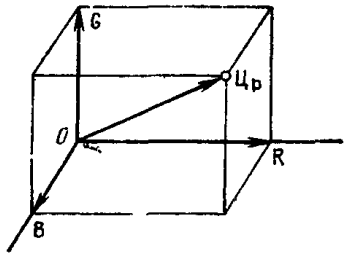


Рис. 2.6. Единичный параллелепипед и равностимульный цвет $Ц_р$ в цветовом пространстве. Длины векторов **R**, **G**, **B** разные

На ортах **R**, **G**, **B** может быть построен в цветовом пространстве *единичный параллелепипед*, диагональ которого, проходящая через начало координат, представляет собой вектор равностимульного цвета $\mathbf{Ц}_р$ с координатами $R = G = B$, и при $R = G = B = 1$

$$\mathbf{Ц}_р = \mathbf{R} + \mathbf{G} + \mathbf{B}. \qquad (2.47)$$

Обычно в качестве такого цвета берут белый. На рис. 2.6 показан в цветовом пространстве вектор равностимульного цвета $Ц_р$, в прямоугольной системе координат и единичный параллелепипед, ребрами которого являются орты **R**, **G**, **B**.

Единичная плоскость в цветовом пространстве. Уравнение плоскости в обычном геометрическом пространстве

$$AX + BY + CZ + D = 0, \qquad (2.48)$$

где X, Y, Z — контравариантные декартовы координаты точки плоскости; A, B, C, D — постоянные коэффициенты.

Если $A = B = C = 1$ и $D = -1$, то из (2.48) получим

$$X + Y + Z = 1. \qquad (2.49)$$

Уравнение (2.49), аналогичное (2.25), называется *единичным* и описывает *единичную плоскость*. Если X, Y, Z координаты R, G, B цвета соответственно, то (2.47) описывает единичную плоскость в цветовом пространстве. В цветовом пространстве все цвета (концы цветовых векторов), подчиняющиеся условиям (2.49) и (2.24), лежат в единичной плоскости, и их количества равны одной трихроматической единице T (хотя эти векторы имеют разную длину, зависящую от положения единичной плоскости, т. е. от выбора основных цветов). Если координаты точки $X = Y = 0$, т. е. $R = G = 0$, то из (2.49) следует $Z = 1$ (т. е. $B = 1$) и этой точке на единичной плоскости соответствует из (2.46) цветовой вектор $\mathbf{Ц} = \mathbf{B}$. Отсюда следует, что конец орта **B** лежит в единичной плоскости. Аналогично можно показать, что концы ортов **R** и **G** также лежат в единичной плоскости, если $Y = Z = 0$, $X = 1$ и если $X = Z = 0$, $Y = 1$. Концы ортов **R**, **G**, **B** образуют на единичной плоскости в цветовом пространстве цветовой треугольник

RGB (рис. 2.7). Вершины этого треугольника имеют координаты (X; 0; 0), (0; Y; 0); (0; 0; Z). Положение единичной плоскости определяется ортами **R**, **G**, **B**. В пространстве другой системы взаимонезависимых ортов $\mathbf{R_1G_1B_1}$ единичная плоскость не будет совпадать с единичной плоскостью в системе ортов **RGB** и в общем случае не будет ей параллельна.

Единичная плоскость играет в колориметрии важную роль, так как положение точки на ней может быть задано только двумя координатами, поскольку третью можно найти по двум другим из (2.49). Например, $Z = 1 - (X + Y)$. Следовательно, точками на этой плоскости удобно изображать не цвет, а цветность, так как цветность определяется только двумя параметрами, а не тремя.

Расположение цветового треугольника на единичной плоскости и его форма определяются выбором ортов основных цветов. Можно так выбрать эти орты, что координаты X, Y, Z (т. е. R, G, B) будут иметь только положительные значения для всех спектральных цветов, изображаемых векторами, исходящими из общего начала координат. Тогда спектральные цвета будут изображаться точками на некоторой кривой, называемой *спектральным локусом*, лежащей внутри треугольника основных цветов на единичной плоскости, как показано на рис. 2.7. Форма спектрального локуса зависит от выбора длин и направлений ортов основных цветов.

В колориметрии вместо единичной плоскости в пространстве иногда пользуются ее проекцией на одну из координатных плоскостей. Положение точки на координатной плоскости также определяется двумя координатами, а не тремя, и поэтому точками на них удобно представлять цветность цвета. Проекции спектрального локуса на координатные плоскости зависят от выбора длин и направлений ортов основных цветов и способа проекции. Изображение цветностей на единичной плоскости или ее проекциях называется *хроматической диаграммой* или *диаграммой цветностей* (*цветовым графиком*).

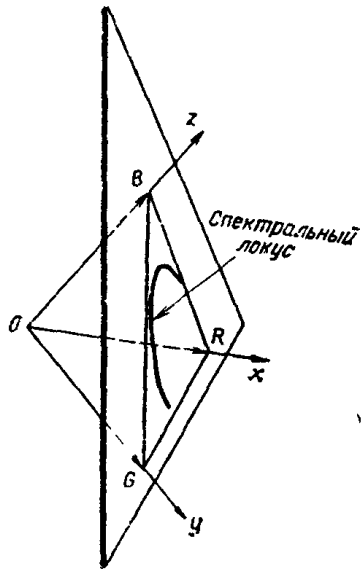


Рис. 2.7. Единичная плоскость в цветовом пространстве. Длины векторов **R**, **G**, **B** могут быть разными

Плоскость постоянной яркости. Цвета одинаковой яркости в цветовом пространстве представлены векторами одинаковой длины, но разных направлений, концы которых лежат на сферической поверхности с центром в начале координат. Это *поверхность постоянной яркости* в цветовом пространстве.

Яркость цвета смеси основных цветов определяется из (2.27). Если положить

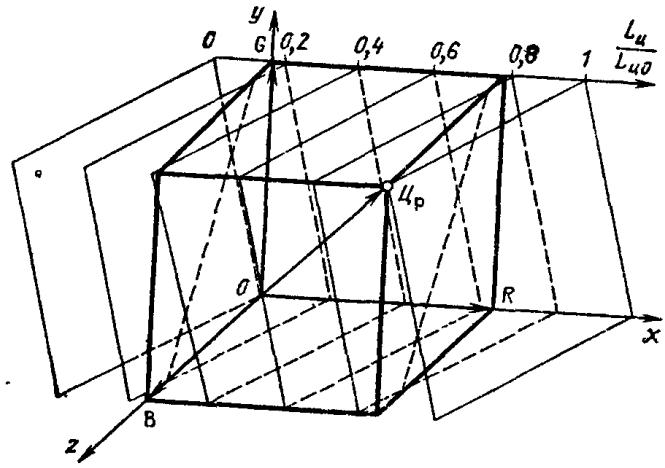


Рис. 2.8. Плоскости постоянной яркости в обычном геометрическом пространстве. Длины векторов R, G, B одинаковы

$$R = X;\ G = Y;\ B = Z;\ L_{(R)} = A;\ L_{(G)} = B;\ L_{(B)} = C;$$
$$L_Ц = D; \tag{2.50}$$

то (2.27) аналогично (2.48) и представляет собой уравнение плоскости в обычном геометрическом пространстве в системе контрварнантных координат. Очевидно, что для всех точек этой плоскости, представляющих цвета, имеющие разные значения координат цвета R, G, B и отвечающие условию (2.27) при $L_Ц = \text{const}$ яркость $L_Ц = -D = \text{const}$. Другому значению D соответствует другая плоскость постоянной яркости. Таким образом, в обычном геометрическом пространстве многообразие цветов, имеющих одинаковую яркость, может быть представлено точками на плоскости. Плоскость постоянной яркости отсекает на координатных осях отрезки

$$a_x = L_Ц/L_{(R)};\ a_y = L_Ц/L_{(G)};\ a_z = L_Ц/L_{(B)}, \tag{2.51}$$

при этом

$$\frac{R}{a_x} + \frac{G}{a_y} + \frac{B}{a_z} = 1, \tag{2.52}$$

что легко проверить, подставив (2.51) в (2.52) и используя (2.27).

Если в (2.27) изменять величину $L_Ц$, то можно получить семейство параллельных плоскостей постоянной яркости. На рис. 2.8 показано такое семейство плоскостей в обычном геометрическом пространстве в прямоугольной системе координат и построен *единичный куб* (т. е. куб, у которого три ребра являются ортами). При $R = G = B = \frac{1}{3} T$, т. е. для равностимульного цвета $Ц_р$, получаем

$$L_{Цр} = L_{(R)} + L_{(G)} + L_{(B)}. \tag{2.53}$$

Цвет $Ц_р$ представлен концом диагонали единичного куба, проходящей через начало координат (в начале координат яркость цвета равна нулю). При этих условиях для плоскостей, пересекающих единичный

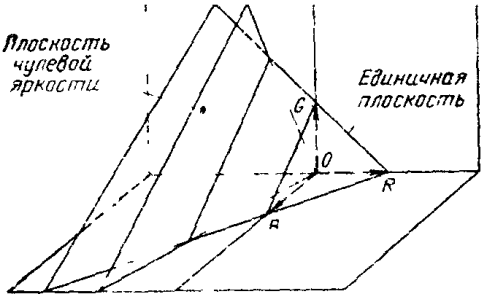


Рис. 2.9. Положение алихны в обычном геометрическом пространстве. Длины векторов R, G, B одинаковы

куб $L_Ц < L_{Цр}$. Направление плоскостей постоянной яркости определяется величинами $L_{(R)}$, $L_{(G)}$, $L_{(B)}$. Если $L_{(R)} = L_{(G)} = L_{(B)}$, то плоскости постоянной яркости параллельны единичной плоскости. Через начало координат проходит плоскость нулевой яркости. Линия ее пересечения с единичной плоскостью является линией точек нулевой яркости, называемой *алихной* (рис. 2.9). Так как яркость реальных цветов отличается от нуля (кроме черного), то на алихне размещаются цвета нереальные. Яркости цветов, представленных точками на единичной плоскости, определяются из (2.28). Из (2.28) получим уравнение алихны на единичной плоскости в обычном геометрическом пространстве, если $L_{(Ц)} = 0$:

$$rL_{(R)} + gL_{(G)} + bL_{(B)} = 0; \qquad (2.54)$$

Подставляя сюда $b = 1 - (r + g)$ из (2.25), получаем

$$r(L_{(R)} - L_{(B)}) + g(L_{(G)} - L_{(B)}) + L_{(B)} = 0. \qquad (2.55)$$

Способ построения алихны описан далее в § 3.10 (см. рис. 2.23).

Определение координат цвета Ц по заданным координатам цветности. Выражения (2.23) позволяют определить координаты цветности r, g, b цвета Ц по известным его координатам R, G, B. Для решения обратной задачи поступим следующим образом. Задаемся условием $R = 1$. Тогда из (2.23) можем написать

$$r = R/(R + G + B) = 1/(1 + G + B), \qquad (2.56)$$

$$g = G/(R + G + B) = G/(1 + G + B). \qquad (2.57)$$

Из (2.56) получим $r = rG + rB = 1$, откуда

$$G = (1 - r - rB)/r. \qquad (2.58)$$

Из (2.57) получим $G = g + gG + gB$, откуда $G(1 - g) = g + gB$. Подставив сюда G из (2.58), имеем $(1 - g)(1 - r - rB)/r = g + gB$, откуда получим $B = (1 - r - g)/r$. Следовательно, $B = b/r$. Подставив это выражение в (2.58), получим $G = g/r$. Отсюда цветовой модуль $m = R + G + B = 1 + (g/r) + (b/r) = 1/r$. Аналогично, полагая $G = 1$, получим $R = r/g$; $B = b/g$, $m = 1/g$, полагая $B = 1$, получим $R = r/b$; $G = g/b$; $m = 1/b$. Таким образом, получили три формулы перехода от r, g, b, к R, G, B:

$$R = 1; \quad G = g/r; \quad B = b/r; \quad m = 1/r; \qquad (2.59)$$

$$G = 1;\ R = r/g;\ B = b/g;\ m = 1/g; \tag{2.60}$$

$$B = 1;\ R = r/b;\ G = g/b;\ m = 1/b. \tag{2.61}$$

В (2.59)... (2.61) отношение $R : G : B = r : g : b$, т. е. сохраняется без изменения.

Пример. Дано $r = 0{,}3$; $g = 0{,}2$; $b = 0{,}5$. Найти координаты этого цвета R, G, B. Из (2.59) при $R = 1$ имеем $G = 0{,}2/0{,}3$; $B = 0{,}5/0{,}3$; $m = 1/0.3$. *Проверка*: по этим значениям R, G, B найдем из (2.23) r, g, b. Получим $m = R + G + B = 1/0.3$; $r = R/m = 0{,}3$; $g = G/m = (0{,}2/0{,}3)0{,}3 = 0{,}2$; $b = B/m = (0{,}5/0{,}3)\ 0{,}3 = 0{,}5$, т. е. R, G, B определены правильно. Такой же расчет можно сделать по (2.60); получим: $G = 1$, $R = 0{,}3/0{,}2$; $B = 0{,}5/0{,}2$; $m = 1/0{,}2$. Расчет по (2.61) дает $B = 1$, $R = 0{,}3/0{,}5$; $G = 0{,}2/0{,}5$; $m = 1/0{,}5$.

2.6. ЦВЕТОВЫЕ УРАВНЕНИЯ В МАТРИЧНОЙ ФОРМЕ

Запишем (2.7) в матричной форме

$$\tilde{\mathbf{Ц}} = \tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{N}}, \tag{2.62}$$

где $\tilde{\mathbf{H}} = (RGB)$; $\tilde{\mathbf{N}} = \begin{pmatrix} (R) \\ (G) \\ (B) \end{pmatrix}$. (2.63)

Если $\tilde{\mathbf{B}}$ и $\tilde{\mathbf{A}}$ — две матрицы, то их произведение выражается матрицей $\tilde{\mathbf{C}}$:

$$\tilde{\mathbf{B}}\,\tilde{\mathbf{A}} = \tilde{\mathbf{C}} \tag{2.64}$$

Обозначив b_{ij} — элементы матрицы $\tilde{\mathbf{B}}$ и a_{ij} — элементы матрицы $\tilde{\mathbf{A}}$, запишем (2.64) в виде

$$\begin{pmatrix} b_{11} b_{12} b_{13} \\ b_{21} b_{22} b_{23} \\ b_{31} b_{32} b_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_{11} a_{12} a_{13} \\ a_{21} a_{22} a_{23} \\ a_{31} a_{32} a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} c_{12} c_{13} \\ c_{21} c_{22} c_{23} \\ c_{31} c_{32} c_{33} \end{pmatrix}, \tag{2.65}$$

где элемент c_{ij} образуется умножением строки i матрицы $\tilde{\mathbf{B}}$ на столбец j матрицы $\tilde{\mathbf{A}}$ таким образом, что первый элемент строки i умножается на первый элемент столбца j, второй элемент строки i умножается на второй элемент столбца j и т. д. и полученные произведения складываются, что дает

$$\begin{aligned}
c_{11} &= b_{11}\,a_{11} + b_{12}\,a_{21} + b_{13}\,a_{31}, & c_{23} &= b_{21}\,a_{13} + b_{22}\,a_{23} + b_{23}\,a_{33}, \\
c_{12} &= b_{11}\,a_{12} + b_{12}\,a_{22} + b_{13}\,a_{32}, & c_{31} &= b_{31}\,a_{11} + b_{32}\,a_{21} + b_{33}\,a_{31}, \\
c_{13} &= b_{11}\,a_{13} + b_{12}\,a_{23} + b_{13}\,a_{33}, & c_{32} &= b_{31}\,a_{12} + b_{32}\,a_{22} + b_{33}\,a_{32}, \\
c_{21} &= b_{21}\,a_{11} + b_{22}\,a_{21} + b_{23}\,a_{31}, & c_{33} &= b_{31}\,a_{13} + b_{32}\,a_{23} + b_{33}\,a_{33}. \\
c_{22} &= b_{21}\,a_{12} + b_{22}\,a_{22} + b_{23}\,a_{32},
\end{aligned} \tag{2.66}$$

Из сравнения (2.63) с (2.65) видим, что элементы R, G, B матрицы $\tilde{\mathbf{H}}$ соответствуют элементам b_{11}, b_{12}, b_{13} матрицы $\tilde{\mathbf{B}}$, а элементы (R), (G), (B) матрицы $\tilde{\mathbf{N}}$ соответствуют элементам a_{11}, a_{21}, a_{31} матрицы $\tilde{\mathbf{A}}$, остальные элементы b_{ij} и a_{ij} равны в матрицах $\tilde{\mathbf{B}}$ и $\tilde{\mathbf{A}}$ в (2.63) нулю и поэтому в матрице $\tilde{\mathbf{C}}$ остается только элемент $c_{11} = R\,(R) + G\,(G) + B\,(B)$, остальные элементы $c_{ij} = 0$, т. е. $c_{11} = Ц$.

Матричная запись удобна для колориметрических расчетов, и поэтому будет использована в дальнейшем.

2.7. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЦВЕТОВОГО ТРЕУГОЛЬНИКА. ПРОСТОЕ ОТНОШЕНИЕ ТРЕХ ТОЧЕК ЦВЕТНОСТИ

Общие положения. В § 2.5 было отмечено, что в колориметрии удобно пользоваться проекциями цветового треугольника и спектрального локуса, расположенными на единичной плоскости, на одну из координатных плоскостей или на некоторую другую плоскость. Форма этих фигур на единичной плоскости зависит от выбора основных цветов, а форма их проекций на выбранную плоскость — от метода проекции. Таким образом, выбирая основные цвета и метод проекции надлежащим образом, можно получить проекцию, обладающую свойствами, необходимыми для решения конкретных задач. Для этого надо, чтобы законы аддитивного сложения цветов не нарушались, так как иначе полученными фигурами нельзя будет пользоваться для целей колориметрии. Эти законы требуют, чтобы при преобразовании одной фигуры в другую плоские фигуры переходили в плоские фигуры, прямые линии переходили в прямые линии и сохранялись:

параллельность прямых линий и плоскостей;

отношение длин параллельных отрезков прямых;

отношение площадей (для фигур, расположенных в одной и той же плоскости или в параллельных плоскостях) и объемов преобразованных и исходных фигур;

расположение одной фигуры внутри другой, если это условие было до преобразования.

Эти свойства фигур сохраняются при преобразованиях, называемых *аффинными* (линейными). Следовательно, цветовое пространство должно обладать аффинными свойствами. В результате такого преобразования фигур (плоских и объемных) могут изменяться углы между отрезками прямых и отношение длин непараллельных отрезков прямых или кривых, так что форма фигур тоже изменится. Для сохранения аффинных свойств преобразования фигур должны быть аффинными. Для получения *аффинного преобразования фигур* пользуются *параллельной проекцией*. В ряде случаев требуется при проекции фигур нарушить некоторые их аффинные свойства. Для этого пользуются *центральной проекцией* (*проективным преобразованием*) фигур.

Линейное (аффинное) преобразование координат точки (вектора) в обычном геометрическом пространстве. Прежде чем рассматривать

преобразование координат цвета в цветовом пространстве, остановимся кратко на преобразовании координат точки (вектора) в евклидовом геометрическом пространстве. Положение точки P в таком пространстве (положение вектора $\mathbf{P}$, исходящего из начала координат и заканчивающегося в данной точке) определяется тремя ее координатами X, Y, Z и тремя координатными осями $0x$, $0y$, $0z$ в данной системе. Можно построить множество других координатных осей и выразить положение той же точки в пространстве в новой системе координат.

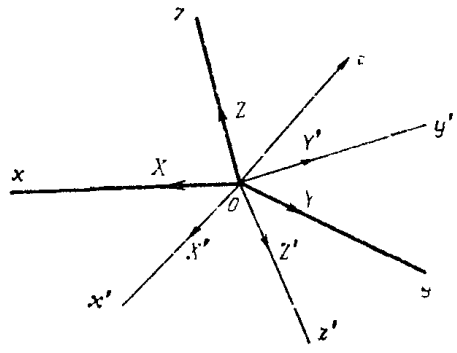


Рис. 2.10. Две системы косоугольных координат в пространстве

Пусть старая и новая системы координат (в общем случае косоугольные) имеют начало в общей точке 0. Обозначим новые координатные оси $0x'$, $0y'$, $0z'$ и новые координаты X', Y', Z' данной точки. Старые и новые координатные оси показаны на рис. 2.10. Здесь же показаны единичные векторы (орты) в старой и новой системах координат, обозначенные $\mathbf{X}$, $\mathbf{Y}$, $\mathbf{Z}$ и $\mathbf{X}'$, $\mathbf{Y}'$, $\mathbf{Z}'$ соответственно (длины всех этих ортов одинаковы и равны единице).

Зависимость между контравариантными декартовыми координатами точки (вектора) в старой и новой системах координат линейная:

$$X = k_1 X' + k_2 Y' + k_3 Z', \quad Y = k_4 X' + k_5 Y' + k_6 Z',$$
$$Z = k_7 X' + k_8 Y' + k_9 Z'. \tag{2.67}$$

В матричной форме (2.67) записывается в виде

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \tilde{\mathbf{A}} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}, \qquad \text{где} \tag{2.68}$$

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} k_1 & k_2 & k_3 \\ k_4 & k_5 & k_6 \\ k_7 & k_8 & k_9 \end{pmatrix}. \tag{2.69}$$

Здесь $k_1, k_2, \ldots, k_9$ — элементы матрицы $\tilde{\mathbf{A}}$.

Выражения (2.67) и (2.68) можно записать в компактной матричной форме

$$(X, Y, Z) = \tilde{\mathbf{A}}\,(X, Y, Z). \tag{2.70}$$

Обратная зависимость также линейна:

$$X' = k_1' X + k_2' Y + k_3' Z, \quad Y' = k_4' X + k_5' Y + k_6' Z,$$
$$Z' = k_7' X + k_8' Y + k_9' Z. \tag{2.71}$$

В матрнчной форме (2.71) имеет внд

$$(X', Y', Z') = \tilde{\mathbf{A}}^{-1}(X, Y, Z), \tag{2.72}$$

где $\tilde{\mathbf{A}}^{-1}$ – матрнца, обратная матрнце $\tilde{\mathbf{A}}$:

$$\tilde{\mathbf{A}}^{-1} = \begin{pmatrix} k_1' & k_2' & k_3' \\ k_4' & k_5' & k_6' \\ k_7' & k_8' & k_9' \end{pmatrix}. \tag{2.73}$$

Выражение (2.67) представляет собой систему трех лннейных уравнений с тремя нензвестными X', Y', Z'. Решая ее отпоснтельно X', Y', Z', получим нз (2.11) коэффициенты, являющнеся элементамн обратной матрнцы $\tilde{\mathbf{A}}^{-1}$:

$$k_1' = \frac{k_5 k_9 - k_8 k_6}{D};\quad k_2' = \frac{k_8 k_3 - k_2 k_9}{D};\quad k_3' = \frac{k_2 k_6 - k_5 k_3}{D};$$

$$k_4' = \frac{k_7 k_6 - k_4 k_9}{D};\quad k_5' = \frac{k_1 k_9 - k_7 k_3}{D};\quad k_6' = \frac{k_4 k_3 - k_1 k_6}{D};$$

$$k_7' = \frac{k_4 k_8 - k_7 k_5}{D};\quad k_8' = \frac{k_7 k_2 - k_1 k_8}{D};\quad k_9' = \frac{k_1 k_5 - k_4 k_2}{D}. \tag{2.74}$$

Величина

$$D = k_1 k_5 k_9 + k_4 k_8 k_3 + k_7 k_2 k_6 - k_1 k_8 k_6 - k_4 k_2 k_9 - k_7 k_5 k_3 \tag{2.75}$$

называется *определителем* снстемы уравненнй (2.67).
Снстема (2.67) будет нметь решенне, если

$$D \neq 0. \tag{2.76}$$

Еслн же $D = 0$, то одно нз трех уравненнй (2.67) является следствнем двух других, т. е. двух уравненнй с тремя пензвестнымн, имеющих бесчнсленное множество решений. Переход от координат X, Y, Z к координатам X', Y', Z' точкн P в соответствнн с (2.71) называется *линейным преобразованием координат.*

Определнм теперь геометрнческнй смысл элементов матрнц $\tilde{\mathbf{A}}$ и $\tilde{\mathbf{A}}^{-1}$. Для этого линейное преобразованне координат выполннм в векторной форме. Еслн новые орты $\mathbf{X}'$; $\mathbf{Y}'$; $\mathbf{Z}'$ имеют соответственно координаты l_X, m_X, n_X; l_Y, m_Y, n_Y; l_Z, m_Z, n_Z в старой системе координат $X'Y'Z'$, то можно напнсать для координат новых ортов в старой снстеме:

$$\mathbf{X}' = l_X \mathbf{X} + m_X \mathbf{Y} + n_X \mathbf{Z},\ \mathbf{Y}' = l_Y \mathbf{X} + m_Y \mathbf{Y} + n_Y \mathbf{Z},$$
$$\mathbf{Z}' = l_Z \mathbf{X} + m_Z \mathbf{Y} + n_Z \mathbf{Z}. \tag{2.77}$$

В матрнчной форме (2.77) имеет внд

$$(\mathbf{X}', \mathbf{Y}', \mathbf{Z}') = \tilde{\mathbf{T}}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}), \tag{2.78}$$

где

$$\tilde{\mathbf{T}} = \begin{pmatrix} l_X & m_X & n_X \\ l_Y & m_Y & n_Y \\ l_Z & m_Z & n_Z \end{pmatrix}. \tag{2.79}$$

Если старые орты **X**, **Y**, **Z** имеют соответственно координаты l'_X, m'_X, n'_X, l'_Y, m'_Y, n'_Y; l'_Z, m'_Z, n'_Z в новой системе координат X′Y′Z′, то можно написать

$$\mathbf{X} = l'_X\,\mathbf{X}' + m'_X\,\mathbf{Y}' + n'_X\,\mathbf{Z}';\ \mathbf{Y} = l'_Y\,\mathbf{X}' + m'_Y\,\mathbf{Y}' + n'_Y\,\mathbf{Z}';$$

$$\mathbf{Z} = l'_Z\,\mathbf{X}' + m'_Z\,\mathbf{Y}' + n'_Z\,\mathbf{Z}'; \tag{2.80}$$

$$(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}) = \tilde{\mathbf{T}}^{-1}(\mathbf{X}', \mathbf{Y}', \mathbf{Z}'); \tag{2.81}$$

где

$$\tilde{\mathbf{T}}^{-1} = \begin{pmatrix} l'_X & m'_X & n'_X \\ l'_Y & m'_Y & n'_Y \\ l'_Z & m'_Z & n'_Z \end{pmatrix}. \tag{2.82}$$

Элементы матрицы $\tilde{\mathbf{T}}^{-1}$ находят по элементам матрицы $\tilde{\mathbf{T}}$ с помощью (2.74). Матрицы $\tilde{\mathbf{T}}$ и $\tilde{\mathbf{T}}^{-1}$ устанавливают связь между старыми и новыми ортами.

Для вектора **P**, имеющего контрвариантные координаты X, Y, Z в старой системе координат XYZ и координаты X', Y', Z' в новой системе координат X′Y′Z′, справедливо

$$\mathbf{P} = X\,\mathbf{X} + Y\,\mathbf{Y} + Z\,\mathbf{Z} = X'\,\mathbf{X}' + Y'\,\mathbf{Y}' + Z'\,\mathbf{Z}'. \tag{2.83}$$

Выражение (2.83) позволяет установить связь между координатами вектора в старой и новой системах координат. Для этого подставим (2.77) в (2.83) и путем приравнивания коэффициентов при **X**, **Y**, **Z** получим координаты вектора **P** в старой системе

$$\mathbf{X} = l'_X\,X' + l'_Y\,Y' + l'_Z\,Z,\quad Y = m'_X\,X' + m'_Y\,Y' + m'_Z\,Z', \tag{2.84}$$

$$Z = n'_X X' + n'_Y Y' + n'_Z Z',\quad (X, Y, Z) = \tilde{\mathbf{T}}_c = (X', Y', Z'), \tag{2.85}$$

где

$$\tilde{\mathbf{T}}_c = \begin{pmatrix} l_X & l_Y & l_Z \\ m_X & m_Y & m_Z \\ n_X & n_Y & n_Z \end{pmatrix} \tag{2.86}$$

— матрица, транспонированная по отношению к матрице $\tilde{T}$.

Матрица $\tilde{\mathbf{T}}_c$ получается из матрицы $\tilde{\mathbf{T}}$, если в последней поменять местами строки и столбцы. Подставив (2.80) в (2.83), получим координаты

$$X' = l'_X X + l'_Y Y + l'_Z Z, \quad Y' = m'_X X + m'_Y Y + m'_Z Z,$$
$$Z' = n'_X X + n'_Y Y + n'_Z Z, \tag{2.87}$$

$$(X', Y', Z') = \tilde{\mathbf{T}}_c^{-1} (X, Y, Z), \tag{2.88}$$

где

$$\tilde{\mathbf{T}}_c^{-1} = \begin{pmatrix} l'_X & l'_Y & l'_Z \\ m'_X & m'_Y & m'_Z \\ n'_X & n'_Y & n'_Z \end{pmatrix}. \tag{2.89}$$

контрагредиентная относительно $\tilde{\mathbf{T}}$ матрица, обратная матрице $\tilde{\mathbf{T}}_c$, или матрица транспонированная относительно матрицы $\mathbf{T}^{-1}$.

Матрица $\tilde{\mathbf{T}}_c^{-1}$ находится из матрицы $\tilde{\mathbf{T}}^{-1}$, если в последней поменять местами строки и столбцы, так как

$$\tilde{\mathbf{T}}_c^{-1} = (\tilde{\mathbf{T}}_c)^{-1} = (\tilde{\mathbf{T}}^{-1})_c. \tag{2.90}$$

Таким образом, если известна одна из матриц $\tilde{\mathbf{T}}$, $\tilde{\mathbf{T}}^{-1}$, $\tilde{\mathbf{T}}_c$, $\tilde{\mathbf{T}}_c^{-1}$, то по ней можно найти остальные три. Матрицы $\tilde{\mathbf{T}}_c$ и $\tilde{\mathbf{T}}_c^{-1}$ устанавливают связь между координатами точки (вектора) в старой и новой системах координат. Их элементы являются координатами новых и старых ортов.

Из вышеизложенного следует, что для нахождения координат точки (вектора) в новой системе координат через координаты этой точки в старой системе (матрицы $\tilde{\mathbf{T}}_c$ или $\tilde{\mathbf{T}}_c^{-1}$) необходимо знать соотношения между старыми и новыми ортами (матрицы $\tilde{\mathbf{T}}$ или $\tilde{\mathbf{T}}^{-1}$). Например, зная матрицу $\tilde{\mathbf{T}}$, находим по ней матрицы $\tilde{\mathbf{T}}^{-1}$, $\tilde{\mathbf{T}}_c$, $\tilde{\mathbf{T}}_c^{-1}$. Преобразование (2.67) обладает аффинными свойствами, о которых было сказано выше, так как является линейным. Из сравнения (2.67) с (2.84) и (2.84) с (2.77) видно, что правые части (2.67) содержат только координаты новых ортов в старой системе координат. Следовательно, линейное преобразование координат вполне определяется заданием положения осей новой системы координат в старой системе.

Можно показать, что для прямоугольной системы координат справедливо

$$\tilde{\mathbf{T}}_c^{-1} = (\mathbf{T}_c)_c = \tilde{\mathbf{T}}; \quad \tilde{\mathbf{T}}^{-1} = (\tilde{\mathbf{T}}_c^{-1})^{-1} = \tilde{\mathbf{T}}_c;$$
$$(X', Y', Z') = \tilde{\mathbf{T}}(X, Y, Z). \tag{2.91}$$

Простое отношение трех точек прямой. При линейном преобразовании фигур (параллельное проектирование) сохраняется так называемое

простое отношение трех точек прямой. На рис. 2.11 показана прямая, на которой лежат три точки A, B, C. Простое отношение этих точек обозначается (ABC) и равно отношению отрезков AC и BC:

$$(ABC) = AC/BC \quad \lambda. \qquad (2.92)$$

Таблица 2.2

Положение точки C	$(ABC) = \lambda$
A	0
Середина отрезка AB	1
B	∞
∞	1

Здесь точка A – начало, точка B конец отрезка. Направление от точки A к точке B будем считать положительным (отрезок AB), обратное направление — отрицательным (отрезок BA). Точки A и B называются *основными* (*базисными*), точка C — *делящей*. Отношение (ABC) положительно $(\lambda > 0)$, если точка C лежит вне отрезка AB, так как AC и BC – положительны в этом случае. Отношение (ABC) отрицательно $(\lambda < 0)$, если точка C лежит внутри отрезка AB, так как отрезок BC в этом случае отрицателен.

В табл. 2.2 даны значения λ при характерных положениях точки C, когда она движется по прямой AB.

На рис. 2.11 показано параллельное проектирование точек A, B, C в точки A', B', C' на прямой, исходящей из точки A; при таком проектировании $(A', B', C') - (ABC) = \lambda$. На рис. 2.12 показаны косоугольные треугольники ABC, в которых три прямые AL, BM и CN пересекаются в общей точке 0. Точка 0 может быть внутри треугольника ABC (рис. 2.12, *а*) или вне его (рис. 2.12,*б*). Простые отношения трех точек на этих прямых обозначим

$$(BCL) = \lambda; \ (CAM) = \mu; \ (ABN) = \nu. \qquad (2.93)$$

Для косоугольного треугольника ABC справедлива *теорема Джованни Чевы* (1648—1734 гг., Италия), которая гласит [18]: если прямые AL, BM и CN проходят через одну общую точку, то $\lambda\mu\nu = 1$.

Доказательство теоремы Чевы читатель может найти в [18]. Из теоремы Чевы следует, что если $\lambda\mu\nu = 1$, то прямые AL, BM и CN проходят через одну точку.

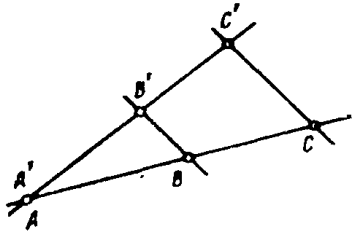


Рис. 2.11. Параллельное проектирование

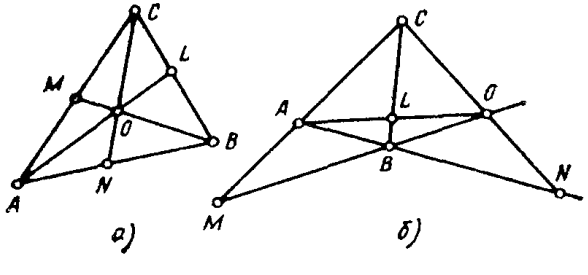


Рис. 2.12. К пояснению теоремы Чевы

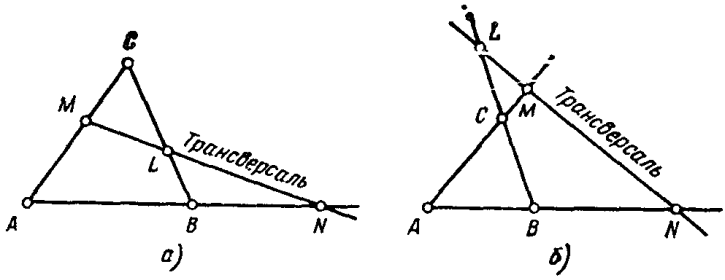


Рис. 2.13. К пояснению теоремы Менелая

а известные теоремы о пересечении в одной точке медиан, биссектрис и высот треугольника — частные случаи теоремы Чевы. Действительно, если $\lambda = \mu = \nu = 1$, то прямые AL, BM, CN — медианы; если $\lambda = c/b$; $\mu = a/c$; $\nu = b/a$, то они — биссектрисы; если $\lambda = \operatorname{tg} C/\operatorname{tg} B$; $\mu = \operatorname{tg} A/\operatorname{tg} C$; $\nu = \operatorname{tg} B/\operatorname{tg} A$, то они — высоты (здесь a, b, c — стороны треугольника, лежащие против его вершин A, B, C, углы A, B, C — углы при вершинах A, B, C). В [18] приведена *теорема Менелая*: если точки L, M, N лежат на одной прямой, то $\lambda\mu\nu = -1$ (рис. 2.13, *а*, прямая MNL называемая *трансверсалью* пересекает две стороны треугольника внутри; на рис. 2.13, *б* трансверсаль пересекает продолжения сторон вне треугольника).

2.8. ЛИНЕЙНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КООРДИНАТ ЦВЕТА В ЦВЕТОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Связь между единичными количествами (ортами) основных цветов в системах RGB и XYZ. Пусть имеются две системы трех основных цветов RGB и XYZ (рис. 2.14).

Систему RGB назовем «старой», систему XYZ — «новой».

Некоторый цвет $Ц$ имеет в этих системах координаты R, G, B и X, Y, Z соответственно. Единичные количества цветов (равные 1T) в старой системе обозначим круглыми скобками (R), (G), (B), (X), (Y), (Z), а в новой системе — квадратными $|R|$, $|G|$, $|B|$, $|X|$, $|Y|$, $|Z|$.

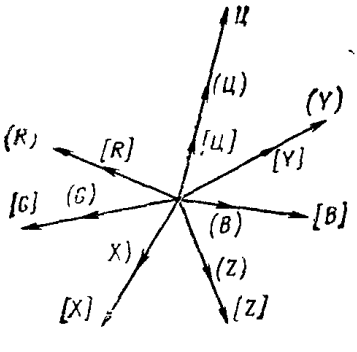


Рис. 2.14. Системы основных цветов RGB и XYZ, представленных в цветовом пространстве вектора ми единичных количеств основных цветов

Векторы, представляющие единичные количества основных цветов (R), (G), (B) в старой системе, отличны по направлению от векторов, представляющих единичные количества основных цветов $|X|$, $|Y|$, $|Z|$ в новой системе, но начала координат в обеих системах совпадают. При этом длины всех ортов (R), (G), (B), |X|, |Y|, |Z| не одинаковы, так как длина цветового вектора определяется яркостью цвета, а единичные количества разных цветов имеют разную яркость. В результате единичные плоскости обеих систем не совпадают друг с другом и не параллельны. Векторы, представляющие единичные количества основных цветов (X), (Y), (Z) в старой системе (концы которых лежат в единичной пло-

скости старой системы), имеют разную длину. То же самое относится к векторам, представляющим единичные количества основных цветов (R), (G), (B) в новой системе (концы которых лежат в единичной плоскости новой системы). Векторы, представляющие (R) и $|R|$, имеют одинаковое направление (также векторы, представляющие (G) и $|G|$, (B) и $|B|$, (X) и $|X|$, (Y) и $|Y|$, (Z) и $|Z|$). Поэтому можно написать для длин векторов

$$(R) \neq (G) \neq (B) \neq |X| \neq |Y| \neq |Z|; \tag{2.94}$$

$$(R) \neq |R|;\ (G) \neq |G|;\ (B) \neq |B|;\ |X| \neq (X);\ |Y| \neq (Y);\ |Z| \neq (Z). \tag{2.95}$$

Для любого цвета $Ц$, взятого в любом количестве, можно написать цветовые уравнения:

$$Ц = R\,(R) + G\,(G) + B\,(B);\quad Ц = X\,|X| + Y\,|Y| + Z\,|Z|. \tag{2.96}$$

Длина вектора **Ц** определяется яркостью цвета и одинакова для обеих систем основных цветов; положение вектора **Ц** в цветовом пространстве определяется цветностью цвета $Ц$ и не зависит от выбора основных цветов (ортов). Один и тот же цвет $Ц$ в разных системах основных цветов представляется одним и тем же вектором в цветовом пространстве, но имеет разные цветовые модули в зависимости от выбора основных цветов, так как единичные количества этого цвета (одна трихроматическая единица T) в разных системах основных цветов различны и представлены векторами разной длины, но одинакового направления. Равноэнергетический цвет, т. е. цвет, для согласования с которым основные цвета берутся в равных количествах трихроматических единиц, обозначим $Ц_{э(RGB)}$ в старой системе и $Ц_{э(XYZ)}$ в новой. Для него координаты цвета $R = G = B = Q$, $X = Y = Z = N$, и согласно (2.96) имеем

$$\begin{aligned} Ц_{э\,(RGB)} &= Q\,(R) + Q\,(G) + Q\,(B) \quad a\,(X) + b\,(Y) + c\,(Z), \\ Ц_{э\,(XYZ)} &= N\,|X| + N\,|Y| + N\,|Z| \quad a_1\,|R| + b_1\,|G| + c_1\,|B|. \end{aligned} \tag{2.97}$$

В общем случае $Q \neq N$ и $a \neq b \neq c$ и $a_1 \neq b_1 \neq c_1$.

По аналогии с (2.78) можно написать шесть уравнений в матричной форме, определяющих линейную связь (линейное преобразование) между единичными количествами основных цветов в этих двух системах

$$((X), (Y), (Z)) = \widetilde{\mathbf{F}}((R), (G), (B)); \tag{2.98}$$

$$((X), (Y), (Z)) = \widetilde{\mathbf{G}}(|X|, |Y|, |Z|); \tag{2.99}$$

$$((R), (G), (B)) = \widetilde{\mathbf{L}}(|R|, |G|, |B|); \tag{2.100}$$

$$((R), (G), (B)) = \widetilde{\mathbf{M}}(|X|, |Y|, |Z|); \tag{2.101}$$

$$((X), (Y), (Z)) = \widetilde{\mathbf{S}}(|R|, |G|, |B|); \tag{2.102}$$

$$(|R|, |G|, |B|) = \widetilde{\mathbf{R}}(|X|, |Y|, |Z|). \tag{2.103}$$

Если считать $|X|$, $|Y|$, $|Z|$ новыми ортами, а (R), (G), (B) — старыми, то матрица $\tilde{M}$ аналогична матрице $\tilde{T}^{-1}$ в (2.81).

Найдем матрицы $\tilde{G}$, $\tilde{L}$, $\tilde{M}$, $\tilde{S}$, $\tilde{R}$ по заданной матрице $\tilde{F}$ и заданным единичным количествам (R), (G), (B) и $|X|$, $|Y|$, $|Z|$. По матрицам $\tilde{F}$, $\tilde{G}$, $\tilde{L}$, $\tilde{M}$, $\tilde{S}$, $\tilde{R}$ можно найти обратные им матрицы $\tilde{F}^{-1}$, $\tilde{G}^{-1}$, $\tilde{L}^{-1}$, $\tilde{M}^{-1}$, $\tilde{S}^{-1}$, $\tilde{R}^{-1}$, а также транспонированные и контрагредиентные матрицы $\tilde{F}_c$, $\tilde{G}_c$, $\tilde{L}_c$, $\tilde{M}_c$, $\tilde{S}_c$, $\tilde{R}_c$, $\tilde{F}_c^{-1}$, $\tilde{G}_c^{-1}$, $\tilde{L}_c^{-1}$, $\tilde{M}_c^{-1}$, $\tilde{S}_c^{-1}$, $\tilde{R}_c^{-1}$. Важно определить матрицы $\tilde{M}_c$ и $\tilde{M}_c^{-1}$, так как $\tilde{M}$ аналогична $\tilde{T}^{-1}$ в (2.81), как указывалось выше.

Покажем, что могут быть получены матрицы $\tilde{M}$, $\tilde{S}$, $\tilde{R}$ из $\tilde{F}$, $\tilde{G}$, $\tilde{L}$, а матрица $\tilde{F}$ из $\tilde{R}$, $\tilde{S}$, $\tilde{M}$. Для этого получим из (2.98)

$$((R), (G), (B))\ \tilde{F}^{-1}((X), (Y), (Z)). \tag{2.104}$$

Известно, что если

$(x_1', x_2', x_3')\ \tilde{A}(x_1, x_2, x_3)$; $(x_1'', x_2'', x_3'')\ \tilde{B}(x_1', x_2', x_3')$, то справедливо

$$(x_1'', x_2'', x_3'')\ \tilde{B}\tilde{A}(x_1, x_2, x_3) = \tilde{C}(x_1, x_2, x_3), \tag{2.105}$$

где $\tilde{C} = \tilde{B}\tilde{A}$ есть произведение матриц.

Заменив $((X), (Y), (Z))$ в правой части (2.104) на (2.99) и учтя, что в произведении матриц нельзя произвольно менять местами сомножители, получим

$$((R), (G), (B)) = \tilde{F}^{-1}\tilde{G}(|X|, |Y|, |Z|). \tag{2.106}$$

Из сравнения (2.106) с (2.101) получим

$$\tilde{M} = \tilde{F}^{-1}\tilde{G}. \tag{2.107}$$

Подставив (2.100) в правую часть (2.98), получим

$$((X), (Y), (Z))\ \tilde{F}\tilde{L}(|R|, |G|, |B|). \tag{2.108}$$

Сравнив (2.108) с (2.102), можно записать

$$\tilde{S} = \tilde{F}\tilde{L}. \tag{2.109}$$

Из (2.107) имеем

$$\tilde{M}_c = (\tilde{F}^{-1}\tilde{G})_c. \tag{2.110}$$

Используя известную формулу

$$(\tilde{A}\tilde{B})_c = \tilde{B}_c\tilde{A}_c, \tag{2.111}$$

получаем из (2.110)

$$\tilde{M}_c = \tilde{G}_c\tilde{F}_c^{-1}. \tag{2.112}$$

В левую часть (2.106) подставим (2.100) вместо (R), (G), (B) и получим

$$\tilde{L}(|R|, |G|, |B|) = \tilde{F}^{-1}\tilde{G}(|X|, |Y|, |Z|); \tag{2.113}$$

Отсюда

$$(|R|, |G|, |B|) \quad \tilde{L}^{-1} \tilde{F}^{-1} \tilde{G}(|X|, |Y|, |Z|). \tag{2.114}$$

Сравнивая (2.114) с (2.103) и используя (2.107), получаем

$$\tilde{R} \quad \tilde{L}^{-1} \tilde{F}^{-1} \tilde{G} \quad \tilde{L}^{-1} \tilde{M}. \tag{2.115}$$

Отметим, что если бы была задана матрица $\tilde{R}$ и требовалось найти матрицу $\tilde{F}$ при заданных единичных количествах (R), (G), (B), $|X|$, $|Y|$, $|Z|$, то, получив из (2.103)

$$((X), (Y), (Z)) - \tilde{R}^{-1}(|R|, |G|, |B|) \tag{2.116}$$

и подставив в него $(|R|, |G|, |B|)$ из (2.102), получим

$$(|X|, |Y|, |Z|) \quad \tilde{R}^{-1} \tilde{S}^{-1}((X), (Y), (Z)), \tag{2.117}$$

и затем подставив (2.101) в левую часть (2.117) вместо $(|X|, |Y|, |Z|)$, имеем

$$\tilde{M}^{-1}((R), (G), (B)) - \tilde{R}^{-1} \tilde{S}^{-1}((X), (Y), (Z)), \tag{2.118}$$

$$((R), (G), (B)) \quad \tilde{R}^{-1} \tilde{S}^{-1} \tilde{M}((X), (Y), (Z)). \tag{2.119}$$

Тогда из сравнения (2.119) с (2.98) имеем

$$\tilde{F} \quad \tilde{R} \tilde{S} \tilde{M}^{-1}. \tag{2.120}$$

Теперь рассмотрим частный случай, когда единичные плоскости систем XYZ и RGB совпадают. Тогда справедливо

$$(R) - |R|; \ (G) \ -|G|; (B) \quad |B|; |X| \quad (X); |Y| \quad (Y); |Z| \quad (Z). \tag{2.121}$$

В этом случае единичные количества цвета $Ц$ в обеих системах одинаковы и представляются в цветовом пространстве одним и тем же вектором. Поэтому модули цвета $Ц$ будут одинаковыми (т.е. длины вектора, выраженные в трихроматических единицах T, в обеих системах одинаковы).

На основании (2.121), сравнивая (2.99) с (2.100), (2.98) с (2.101) (2.102) с (2.103), получим для данного случая

$$\tilde{G} \quad \tilde{L} = \tilde{I}; \tilde{F} \quad \tilde{M}^{-1}; \tilde{R} \quad \tilde{S}^{-1}, \tag{2.122}$$

где единичная матрица

$$\tilde{I} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{2.123}$$

Задание матрицы $\tilde{F}$ означает, что в цветовом пространстве заданы цвета **(R)**, **(G)**, **(B)** и **(X)**, **(Y)**, **(Z)**, координаты цветности вершин цвето-

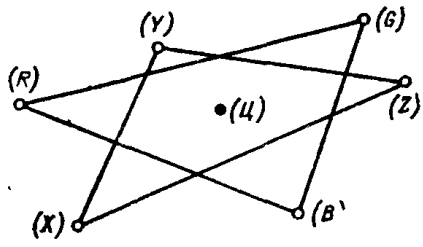


Рис. 2.15. Треугольники основных цветов R, G, B и X, Y, Z на единичной плоскости системы RGB

вого треугольника (X), (Y), (Z) на единичной плоскости системы RGB (т. е. задан треугольник (X), (Y), (Z) на этой плоскости), как показано на рис. 2.15. Эти координаты являются элементами матрицы $\tilde{F}$. Найдем связь между единичными количествами основных цветов R, G, B и X, Y, Z, взятых в старой (RGB) и новой (XYZ) системах. Для единичных количеств основных цветов X, Y, Z, в старой системе в соответствии с (2.24) можно написать единичные уравнения:

$$(X) = r_{(X)}(R) + g_{(X)}(G) + b_{(X)}(B),\ (Y) = r_{(Y)}(R) + g_{(Y)}(G) + b_{(Y)}(B),$$
$$(Z) = r_{(Z)}(R) + g_{(Z)}(G) + b_{(Z)}(B), \qquad (2.124)$$

где r, g, b с соответствующими индексами — заданные (известные) координаты цветности основных цветов X, Y, Z в старой системе, т. е. координаты цветности вершин цветового треугольника (X), (Y), (Z) на единичной плоскости системы RGB. Цвета X, Y, Z линейно независимы, поэтому определитель системы (2.124) не равен нулю.

Из сравнения (2.124) с (2.98) следует, что

$$\tilde{F} = \begin{pmatrix} r_{(X)} & g_{(X)} & b_{(X)} \\ r_{(Y)} & g_{(Y)} & b_{(Y)} \\ r_{(Z)} & g_{(Z)} & b_{(Z)} \end{pmatrix}. \qquad (2.125)$$

Из (2.118) по аналогии с (2.71) найдем

$$(R) = x'_{(R)}(X) + y'_{(R)}(Y) + z'_{(R)}(Z);\ (G) = x'_{(G)}(X) + y'_{(G)}(Y) + z'_{(G)}(Z);$$
$$(B) = x'_{(B)}(X) + y'_{(B)}(Y) + z'_{(B)}(Z), \qquad (2.126)$$

т. е. $((R), (G), (B)) = \tilde{F}^{-1}((X), (Y), (Z)), \qquad (2.127)$

$$\tilde{F}^{-1} = \begin{pmatrix} x'_{(R)} & y'_{(R)} & z'_{(R)} \\ x'_{(G)} & y'_{(G)} & z'_{(G)} \\ x'_{(B)} & y'_{(B)} & z'_{(B)} \end{pmatrix}, \qquad (2.128)$$

где x', y', z' с соответствующими индексами могут быть найдены с помощью (2.74) и (2.75).

Так как (R), (G), (B) — единичные количества цветов R, G, B в старой системе, то все уравнения (2.126) являются единичными. Следовательно,

$$x'_{(R)} + y'_{(R)} + z'_{(R)} = 1;\ x'_{(G)} + y'_{(G)} + z'_{(G)} = 1;\ x'_{(B)} + y'_{(B)} + z'_{(B)} = 1. \qquad (2.129)$$

Так как цвета R, G, B линейно независимые, то определитель системы уравнений (2.126) не равен нулю.

Определение модулей цветов X, Y, Z в системе RGB через координаты цвета их смеси в этой системе.

Заданный цвет $Ц$ можно получить смесью основных цветов R,G, B, взятых в количествах $R_Ц$, $G_Ц$, $B_Ц$ в старой системе. Этот же цвет $Ц$ можно получить также смесью основных цветов X, Y, Z, взятых в старой системе в количествах $X_Ц$, $Y_Ц$, $Z_Ц$ или взятых в новой системе в количествах $X'_Ц$, $Y'_Ц$, $Z'_Ц$. Поэтому справедливо

$$Ц \quad R_Ц(R) + G_Ц(G) + B_Ц(B) = X_Ц(X) + Y_Ц(Y) + Z_Ц(Z) = X'_Ц|X| + Y'_Ц|Y| + Z'_Ц|Z|. \tag{2.130}$$

Установим связь между модулями m_X, m_Y, m_Z цветов X, Y, Z и координатами $R_Ц$, $G_Ц$, $B_Ц$ цвета $Ц$ в старой системе. Для (2.130) можно написать

$$X_Ц = R_X(R) + G_X(G) + B_X(B), \quad Y_Ц = R_Y(R) + G_Y(G) + B_Y(B),$$
$$Z_Ц = R_Z(R) + G_Z(G) + B_Z(B). \tag{2.131}$$

Из (2.5) следует, что

$$R_Ц = R_X + R_Y + R_Z, \quad G_Ц = G_X + G_Y + G_Z, \quad B_Ц = B_X + B_Y + B_Z. \tag{2.132}$$

Преобразуем (2.132), пользуясь (2.23):

$$R_Ц = r_X m_X + r_Y m_Y + r_Z m_Z, \quad G_Ц = g_X m_X + g_Y m_Y + g_Z m_Z,$$
$$B_Ц = b_X m_X + b_Y m_Y + b_Z m_Z. \tag{2.133}$$

Сравнивая (2.133) с (2.125), имеем

$$(R_Ц, G_Ц, B_Ц) = \tilde{F}_c(m_X, m_Y, m_Z),$$
$$(m_X, m_Y, m_Z) = \tilde{F}_c^{-1}(R_Ц, G_Ц, B_Ц). \tag{2.134}$$

Определение матриц $\tilde{G}$, $\tilde{L}$, $\tilde{M}$, $\tilde{S}$, связывающих единичные количества основных цветов R,G, B и X, Y, Z, взятых в старой и новой системах. Найдем матрицу $\tilde{G}$ из (2.99). Для решения этой задачи при заданных единичных количествах (R), (G), (B) и $|X|$, $|Y|$, $|Z|$ недостаточно знать матрицу $\tilde{F}$. Необходимо еще знать для обеих систем координаты цветности одной из точек, лежащих на линии пересечения единичных плоскостей систем RGB и XYZ. Эта точка представляет единичное количество цвета (в обеих системах основных цветов), которые назовем эталонным (или исходным и обозначим $Ц_э$). Для единичных количеств этого цвета в обеих системах основных цветов можно написать единичные уравнения

$$(Ц_э) \quad r_э(R) + g_э(G) + b_э(B), \quad |Ц_э| = x_э|X| + y_э|Y| + z_э|Z|, \tag{2.135}$$

где для координат цветности эталонного цвета в обеих системах справедливо

$$r_э + g_э + b_э = 1; \quad x_э + y_э + z_э = 1. \tag{2.136}$$

Из определения эталонного цвета следует для его единичных количеств

$$(Ц_э) = [Ц_э], \tag{2.137}$$

т. е. векторы, представляющие единичные трихроматические количества $(Ц_э)$ и $|Ц_э|$ — эталонного цвета в обеих системах основных цветов совпадают по направлению и длины их одинаковы, поэтому модули цвета $Ц_э$ в обеих системах одинаковы.

Подставив (R), (G), (B) из (2.126) в (2.135), получим

$$(Ц_э) = \delta_1 (X) + \delta_2 (Y) + \delta_2 (Z), \tag{2.138}$$

$$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 1; \tag{2.139}$$

$$\delta_1 = r_э x'_{(R)} + g_э x'_{(G)} + b_э x'_{(B)}, \quad \delta_2 = r_э y'_{(R)} + g_э y'_{(G)} + b_э y'_{(B)},$$

$$\delta_3 = r_э z'_{(R)} + g_э z'_{(G)} + b_э z'_{(B)}. \tag{2.140}$$

В качестве эталонного обычно берут один из белых цветов, заданный в одной системе основных цветов, и задают его координаты в другой системе, например, делают его равностимульным. Если в частном случае в качестве эталонного цвета выбран цвет, являющийся равностимульным в обеих системах, т. е. $Ц_э = Ц_р$, то из (2.135) и (2.26) получим

$$r_э = g_э = b_э = 1/3; \quad x_э = y_э = z_э = 1/3. \tag{2.141}$$

Подставив (2.138) и (2.135) в (2.137), получим

$$\delta_1 (X) + \delta_2 (Y) + \delta_3 (Z) = x_э |X| + y_э |Y| + z_э |Z|,$$

что возможно, если

$$\delta_1 (X) = x_э |X|; \quad \delta_2 (Y) = y_э |Y|; \quad \delta_3 (Z) = z_э |Z|. \tag{2.142}$$

Из (2.17) следует

$$(X) = m_{(X)} |X|; \quad (Y) = m_{(Y)} |Y|; \quad (Z) = m_{(Z)} |Z|,$$

$$|X| = (X)\, m_{(X)}; \quad |Y| = (Y)\, m_{(Y)}; \quad |Z| = |Z|\, m_{(Z)}, \tag{2.143}$$

где $m_{(X)}$, $m_{(Y)}$, $m_{(Z)}$ — модули количеств цветов (X), (Y), (Z) в системе XYZ соответственно. Из сравнения (2.143) с (2.142) имеем

$$m_{(X)} = x_э \delta_1; \quad m_{(Y)} = y_э \delta_2; \quad m_{(Z)} = z_э \delta_3. \tag{2.144}$$

Записав (2.143) в матричной форме, получим (2.99). Из сравнения (2.99) и (2.143) имеем

$$\tilde{\mathbf{G}} = \begin{pmatrix} m_{(X)}; & 0; & 0 \\ 0; & m_{(Y)}; & 0 \\ 0; & 0; & m_{(Z)} \end{pmatrix}; \quad \tilde{\mathbf{G}}^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{m_{(X)}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_{(Y)}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_{(Z)}} \end{pmatrix}. \tag{2.145}$$

Перейдем к отысканию матрицы $\tilde{L}$ из (2.100). По аналогии с (2.143) напишем

$$(R) \quad m_{(R)}|R|;\ (G) \cdot m_{(G)}|G|;\ (B) = m_{(B)}|B|, \tag{2.146}$$

где $m_{(R)}$, $m_{(G)}$, $m_{(B)}$ — модули количеств цветов (R), (G), (B) в системе XYZ соответственно.

Из (2.146) находим

$$|R| - (R)\ m_{(R)};\ |G| - (G)\ m_{(G)};\ |B| = (B)/m_{(B)}. \tag{2.147}$$

В матричной форме (2.147) с учетом (2.100) имеют вид

$$(|R|, |G|, |B|) - \tilde{L}^{-1}((R), (G), (B)). \tag{2.148}$$

Записав (2.146) в матричной форме, получим (2.100). Из сравнения (2.100) с (2.146) и (2.148) с (2.147) следует

$$\tilde{L} - \begin{pmatrix} m_{(R)}; & 0; & 0 \\ 0; & m_{(G)}; & 0 \\ 0; & 0; & m_{(B)} \end{pmatrix};\quad \tilde{L}^{-1} = \begin{pmatrix} 1/m_{(R)}; & 0; & 0 \\ 0; & 1/m_{(G)}; & 0 \\ 0; & 0; & 1/m_{(B)} \end{pmatrix}. \tag{2.149}$$

Чтобы пользоваться (2.149), надо знать модули $m_{(R)}$, $m_{(G)}$, $m_{(B)}$. Для их определения подставим (X), (Y), (Z) из (2.142) в (2.126) и получим

$$(R) - \frac{x'_{(R)}\, x_0}{\delta_1}|X| + \frac{y'_{(R)}\, y_0}{\delta_2}|Y| + \frac{z'_{(R)}\, z_0}{\delta_3}|Z|;$$

$$(G) - \frac{x'_{(G)}\, x_0}{\delta_1}|X| + \frac{y'_{(G)}\, y_0}{\delta^2}|Y| + \frac{z'_{(G)}\, z_0}{\delta_3}|Z|;$$

$$(B) \quad \frac{x'_{(B)}\, x_0}{\delta_1}|X| + \frac{y'_{(B)}\, y_0}{\delta_2}|Y| \cdot \frac{z'_{(B)}\, z_0}{\delta_3}|Z|. \tag{2.150}$$

С учетом (2.144) перепишем (2.150) в виде

$$(R) \cdot - x'_{(R)}\, m_{(X)}|X| \quad y'_{(R)}\, m_{(Y)}|Y| + z'_{(R)}\, m_{(Z)}|Z|,$$

$$(G) \quad x'_{(G)}\, m_{(X)}|X| + y'_{(G)}\, m_{(Y)}|Y| + z'_{(G)}\, m_{(Z)}|Z|,$$

$$(B) \quad x'_{(B)}\, m_{(X)}|X| + y'_{(B)}\, m_{(Y)}|Y| + z'_{(B)}\, m_{(Z)}|Z|. \tag{2.150а}$$

Уравнения (2.150) и (2.150а) не являются единичными, так как они выражают единичные количества цветов (R), (G), (B) в системе XYZ (а не в системе RGB), в которой эти количества не являются единичными.

Сумма коэффициентов в первой строке (2.150, а) дает модуль $m_{(R)}$ для количества цвета (R) в системе XYZ в соответствии с (2.16). Аналогично находим модули для количеств цветов (G) и (B) в системе XYZ:

$$m_{(R)} = x'_{(R)}\, m_{(X)} \quad y'_{(R)}\, m_{(Y)} + z'_{(R)}\, m_{(Z)} - X_{(R)} + Y_{(R)} + Z_{(R)};$$

$$m_{(G)} - x'_{(G)}\, m_{(X)} + y'_{(G)}\, m_{(Y)} + z'_{(G)}\, m_{(Z)} = X_{(G)} + Y_{(G)} + Z_{(G)};$$

$$m_{(B)} = x'_{(B)}\, m_{(X)} + y'_{(B)}\, m_{(Y)} + z'_{(B)}\, m_{(Z)} = X_{(B)} + Y_{(B)} + Z_{(B)}. \tag{2.151}$$

Здесь x', y', z' с индексами (R), (G), (B) — элементы матрицы $\tilde{F}^{-1}$ взятые из (2.128).

Для определения матрицы $\tilde{M}$ запишем в общем виде (2.150) аналогично (2.7):

$$(R) = X_{(R)}|X| + Y_{(R)}|Y| + Z_{(R)}|Z|,$$
$$(G) = X_{(G)}|X| + Y_{(G)}|Y| + Z_{(G)}|Z|,$$
$$(B) = X_{(B)}|X| + Y_{(B)}|Y| + Z_{(B)}|Z|, \qquad (2.152)$$

где X, Y, Z с индексами (R), (G), (B) — координаты количеств цветов (R), (G), (B) в системе XYZ.

Из сравнения (2.152) с (2.150 а) имеем

$$X_{(R)} = x'_{(R)} m_{(X)};\quad Y_{(R)} = y'_{(R)} m_{(Y)};\quad Z_{(R)} = z'_{(R)} m_{(Z)},$$
$$X_{(G)} = x'_{(G)} m_{(X)};\quad Y_{(G)} = y'_{(G)} m_{(Y)};\quad Z_{(G)} = z'_{(G)} m_{(Z)},$$
$$X_{(B)} = x'_{(B)} m_{(X)};\quad Y_{(B)} = y'_{(B)} m_{(Y)};\quad Z_{(B)} = z'_{(B)} m_{(Z)}. \qquad (2.153)$$

Из сравнения (2.152) с (2.101) видно, что

$$\tilde{M} = \begin{pmatrix} X_{(R)} & Y_{(R)} & Z_{(R)} \\ X_{(G)} & Y_{(G)} & Z_{(G)} \\ X_{(B)} & Y_{(B)} & Z_{(B)} \end{pmatrix}. \qquad (2.154)$$

Элементы матрицы $\tilde{M}$ даны в (2.153). Матрица $\tilde{M}$ аналогична матрице $\tilde{T}^{-1}$ из (2.78), если считать (R), (G), (B) ортами старой системы, а |X|, |Y|, |Z| — ортами новой. Матрицу $\tilde{S}$ найдем из (2.125) и (2.149), пользуясь (2.109).

Определение матрицы $\tilde{R}$, связывающей единичные количества основных цветов R, G, B и X, Y, Z в новой системе. Формула (2.103) представляет собой систему единичных уравнений в системе XYZ. При этом количества цветов $|R|$, $|G|$, $|B|$ представлены точками на единичной плоскости системы XYZ, которые являются вершинами цветового треугольника $|R|$ $|G|$ $|B|$ (рис. 2.16). Количества цветов $|X|$, $|Y|$, $|Z|$ можно представить точками на этой единичной плоскости, являющимися вершинами цветового треугольника $|X|$ $|Y|$ $|Z|$. Следовательно, элементы неизвестной матрицы $\tilde{R}$ являются координатами вершин цветового треугольника $|R|$ $|G|$ $|B|$ (т. е. координатами цветности), лежащего на единичной плоскости системы XYZ.

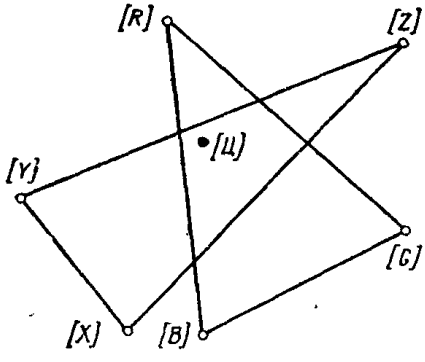


Рис. 2.16. Треугольники основных цветов R, G, B и X, Y, Z на единичной плоскости системы XYZ

Для определения матрицы $\widetilde{\mathbf{R}}$ воспользуемся (2.115), матрицы $\widetilde{\mathbf{L}}^{-1}$, $\widetilde{\mathbf{F}}^{-1}$, $\widetilde{\mathbf{G}}^{-1}$ были определены выше через элементы матрицы $\widetilde{\mathbf{F}}$ (координаты цветности вершин цветового треугольника (X) (Y) (Z) на единичной плоскости системы RGB) и координаты эталонного цвета.

Подставив (2.149) и (2.154) в (2.115), получим, пользуясь для умножения матриц (2.65) и (2.66):

$$\widetilde{\mathbf{R}} = \widetilde{\mathbf{L}}^{-1}\widetilde{\mathbf{M}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{m_{(R)}}; & 0; & 0; \\ 0; & \frac{1}{m_{(G)}}; & 0; \\ 0: & 0; & \frac{1}{m_{(B)}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{(R)} & Y_{(R)} & Z_{(R)} \\ X_{(G)} & Y_{(G)} & Z_{(G)} \\ X_{(B)} & Y_{(B)} & Z_{(B)} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{1}{m_{(R)}} X_{(R)}; & \frac{1}{m_{(R)}} Y_{(R)}; & \frac{1}{m_{(R)}} Z_{(R)} \\ \frac{1}{m_{(G)}} X_{(G)}; & \frac{1}{m_{(G)}} Y_{(G)}; & \frac{1}{m_{(G)}} Z_{(G)} \\ \frac{1}{m_{(B)}} X_{(B)}; & \frac{1}{m_{(B)}} Y_{(B)}; & \frac{1}{m_{(B)}} Z_{(B)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_R & y_R & z_R \\ x_G & y_G & z_G \\ x_B & y_B & z_B \end{pmatrix}. \qquad (2.155)$$

Подставив (2.155) в (2.103), получим искомую зависимость $|R|$, $|G|$, $|B|$ от $|X|$, $|Y|$, $|Z|$ с учетом (2.153):

$$|R| = \frac{1}{m_{(R)}}\left(\frac{x'_{(R)}\, x_э}{\delta_1}|X| + \frac{y'_{(R)}\, y_э}{\delta_2}|Y| + \frac{z'_{(R)}\, z_э}{\delta_3}|Z|\right) =$$

$$= x_R|X| + y_R|Y| + z_R|Z|;$$

$$|G| = \frac{1}{m_{(G)}}\left(\frac{x'_{(G)}\, x_э}{\delta_1}|X| + \frac{y'_{(G)}\, y_э}{\delta_2}|Y| + \frac{z'_{(G)}\, z_э}{\delta_3}|Z|\right) =$$

$$= x_G|X| + y_G|Y| + z_G|Z|;$$

$$|B| = \frac{1}{m_{(B)}}\left(\frac{x'_{(B)}\, x_э}{\delta_1}|X| + \frac{y'_{(B)}\, y_э}{\delta_2}|Y| + \frac{z'_{(B)}\, z_э}{\delta_3}|Z|\right) =$$

$$= x_B|X| + y_B|Y| + z_B|Z|. \qquad (2.156)$$

Здесь

$$x_R = \frac{x'_{(R)}\, x_э}{m_{(R)}\,\delta_1}; \quad y_R = \frac{y'_{(R)}\, y_э}{m_{(R)}\,\delta_2}; \quad z_R = \frac{z'_{(R)}\, z_э}{m_{(R)}\,\delta_3};$$

$$x_G = \frac{x'_{(G)}\, x_э}{m_{(G)}\,\delta_1}; \quad y_G = \frac{y'_{(G)}\, y_э}{m_{(G)}\,\delta_2}; \quad z_G = \frac{z'_{(G)}\, z_э}{m_{(G)}\,\delta_3};$$

$$x_B = \frac{x'_{(B)}\, x_э}{m_{(B)}\,\delta_1}; \quad y_B = \frac{y'_{(B)}\, y_э}{m_{(B)}\,\delta_2}; \quad z_{(B)} = \frac{z'_{(B)}\, z_э}{m_{(B)}\,\delta_3}. \qquad (2.157)$$

Уравнения (2.156) — единичные, так как единичные количества цветов $|R|$, $|G|$, $|B|$ в системе XYZ выражены через $|X|$, $|Y|$, $|Z|$. Поэтому справедливо

$$x_R + y_R + z_R = 1;\quad x_G + y_G + z_G = 1;\quad x_B + y_B + z_B = 1. \tag{2.158}$$

Отметим, что (2.156) можно также получить, подставляя (2.150) в (2.147).

Определение матриц $\tilde{\mathbf{M}}_c$ и $\tilde{\mathbf{M}}_c^{-1}$, связывающих координаты цвета $Ц$ в системах XYZ и RGB и имеющих важное значение в теории колориметрии и цветного телевидения. Зная координаты R, G, B цвета $Ц$ из (2.96), находим его координаты X, Y, Z. Так как цвет $Ц$ в обеих системах один и тот же, то можно написать аналогично (2.83)

$$Ц = R(R) + G(G) + B(B) \quad X|X| + Y|Y| \quad Z|Z|. \tag{2.159}$$

Заметим, что это равенство означает не равенства модулей цвета $Ц$ в этих системах, а один и тот же вектор **Ц**. Подставив (R), (G), (B) из (2.150) в (2.159), получим с учетом (2.153) координаты цвета $Ц$ в системе XYZ:

$$\begin{aligned}
X &= (x_э/\delta_1)(Rx'_{(R)} + Gx'_{(G)} + Bx'_{(B)}) \quad X_{(R)} R + X_{(G)} G + X_{(B)} B;\\
Y &= (y_э/\delta_2)(Ry'_{(R)} + Gy'_{(G)} + By'_{(B)}) \quad Y_{(R)} R + Y_{(G)} G + Y_{(B)} B;\\
Z &= (z_э/\delta_3)(Rz'_{(R)} + Gz'_{(G)} + Bz'_{(B)}) \quad Z_{(R)} R + Z_{(G)} G + Z_{(B)} B.
\end{aligned} \tag{2.160}$$

Уравнения (2.160) аналогичны (2.77).

Из сравнения (2.160) с (2.154) следует, что в матричном виде (2.160) можно записать с учетом (2.112)

$$(X, Y, Z) \quad \tilde{\mathbf{M}}_c (R, G, B) = \tilde{\mathbf{G}}_c \tilde{\mathbf{F}}_c^{-1} (R, G, B), \tag{2.161}$$

где $\tilde{\mathbf{M}}_c$ — матрица, транспонированная по отношению к матрице $\tilde{\mathbf{M}}$ из (2.154). Используя (2.154), (2.153) и (2.144), имеем

$$\tilde{\mathbf{M}}_c \quad \begin{pmatrix} X_{(R)} & X_{(G)} & X_{(B)} \\ Y_{(R)} & Y_{(G)} & Y_{(B)} \\ Z_{(R)} & Z_{(G)} & Z_{(B)} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} m_{(X)} x'_{(R)}; & m_{(X)} x'_{(G)}; & m_{(X)} x'_{(B)} \\ m_{(Y)} y'_{(R)}; & m_{(Y)} y'_{(G)}; & m_{(Y)} y'_{(B)} \\ m_{(Z)} z'_{(R)}; & m_{(Z)} z'_{(G)}; & m_{(Z)} z'_{(B)} \end{pmatrix} \tag{2.162}$$

Из (2.128) находим

$$\tilde{\mathbf{F}}_c^{-1} = \begin{pmatrix} x'_{(R)} & x'_{(G)} & x'_{(B)} \\ y'_{(R)} & y'_{(G)} & y'_{(B)} \\ z'_{(R)} & z'_{(G)} & z'_{(B)} \end{pmatrix}. \tag{2.163}$$

Решая (2.160) относительно R, G, B, получаем координаты цвета в старой системе, выраженные через координаты X, Y, Z в новой системе:

$$\begin{aligned}
R &= X'_{(R)} X + X'_{(G)} Y + X'_{(B)} Z, \quad G = Y'_{(R)} X + Y'_{(G)} Y + Y'_{(B)} Z,\\
B &= Z'_{(R)} X + Z'_{(G)} Y + Z'_{(B)} Z
\end{aligned} \tag{2.164}$$

или в матричной форме из (2.161):

$$(R, G, B) = \tilde{\mathbf{M}}_c^{-1}(X, Y, Z), \tag{2.165}$$

$$\tilde{\mathbf{M}}_c^{-1} = \begin{pmatrix} X'_{(R)} & X'_{(G)} & X'_{(B)} \\ Y'_{(R)} & Y'_{(G)} & Y'_{(B)} \\ Z'_{(R)} & Z'_{(G)} & Z'_{(B)} \end{pmatrix}. \tag{2.166}$$

Найдем элементы матрицы $\tilde{\mathbf{M}}_c^{-1}$ по элементам матрицы $\tilde{\mathbf{M}}_c$, пользуясь (2.67), (2.71), (2.74) и (2.75), получим из (2.162):

$$X'_{(R)} = \frac{a}{D' m_{(X)}}; \quad X'_{(G)} = -\frac{b}{D' m_{(Y)}}; \quad X'_{(B)} = \frac{c}{D' m_{(Z)}};$$

$$Y'_{(R)} = \frac{d}{D' m_{(X)}}; \quad Y'_{(G)} = \frac{e}{D' m_{(Y)}}; \quad Y'_{(B)} = -\frac{f}{D' m_{(Z)}};$$

$$Z'_{(R)} = \frac{g}{D' m_{(X)}}; \quad Z'_{(G)} = -\frac{h}{D' m_{(Y)}}; \quad Z'_{(B)} = \frac{i}{D' m_{(Z)}}; \tag{2.167}$$

$$a = y'_{(G)} z'_{(G)} - y'_{(B)} z'_{(G)}; \quad b = x'_{(G)} z'_{(B)} + x'_{(B)} z'_{(G)};$$
$$c = x'_{(G)} y'_{(B)} - x'_{(B)} y'_{(G)}; \quad d = -y'_{(R)} z'_{(B)} + y'_{(B)} z'_{(R)};$$
$$e = x'_{(R)} z'_{(B)} - x'_{(B)} z'_{(R)}; \quad f = -x'_{(R)} y'_{(B)} + x'_{(B)} y'_{(R)};$$
$$g = y'_{(R)} z'_{(G)} - y'_{(G)} z'_{(R)}; \quad h = -x'_{(R)} z'_{(G)} + x'_{(G)} z'_{(R)};$$
$$i = x'_{(R)} y'_{(G)} - x'_{(G)} y'_{(R)};$$
$$D' = x'_{(R)} y'_{(G)} z'_{(B)} + x'_{(G)} y'_{(B)} z'_{(R)} + x'_{(B)} y'_{(R)} z'_{(G)} - x'_{(R)} y'_{(B)} z'_{(G)} -$$
$$- x'_{(G)} y'_{(R)} z'_{(B)} - x'_{(B)} y'_{(G)} z'_{(R)} = x'_{(R)} (y'_{(G)} z'_{(B)} - y'_{(B)} z'_{(G)}) +$$
$$+ x'_{(G)} (y'_{(B)} z'_{(R)} - y'_{(R)} z'_{(B)}) + x'_{(B)} (y'_{(R)} z'_{(G)} - y'_{(G)} z'_{(R)}). \tag{2.168}$$

В частном случае, если $m_{(X)} = m_{(Y)} = m_{(Z)} = 1$, сравнивая (2.162) с (2.128), имеем

$$\tilde{\mathbf{M}}_c = \tilde{\mathbf{F}}_c^{-1}; \quad (X, Y, Z) = \tilde{\mathbf{F}}_c^{-1}(R, G, B),$$
$$(R, G, B) = (\tilde{\mathbf{F}}_c^{-1})^{-1}(X, Y, Z) = \tilde{\mathbf{F}}_c(X, Y, Z), \tag{2.169}$$

так как

$$(\tilde{\mathbf{F}}_c^{-1})^{-1} = \tilde{\mathbf{M}}_c^{-1} = \tilde{\mathbf{F}}_c, \tag{2.170}$$

где по аналогии с (2.79) и (2.86) имеем из (2.125)

$$\tilde{\mathbf{F}}_c = \begin{pmatrix} r_X & r_Y & r_Z \\ g_X & g_Y & g_Z \\ b_X & b_Y & b_Z \end{pmatrix}. \tag{2.171}$$

Покажем в качестве примера, как можно получить (2.165) с помощью матричных преобразований, которыми будем пользоваться и в дальнейшем. Обозначим

$$\widetilde{\mathbf{A}}_1=\begin{pmatrix}R\\G\\B\end{pmatrix};\quad \widetilde{\mathbf{A}}_2\quad\begin{pmatrix}(R)\\(G)\\(B)\end{pmatrix};\quad \widetilde{\mathbf{A}}_3=\begin{pmatrix}X\\Y\\Z\end{pmatrix};\quad \widetilde{\mathbf{A}}_4\quad\begin{pmatrix}[X]\\[Y]\\[Z]\end{pmatrix}. \tag{2.172}$$

Тогда из (2.96) по аналогии с (2.62) имеем

$$\widetilde{\mathbf{Ц}}=\widetilde{\mathbf{A}}_{1c}\,\widetilde{\mathbf{A}}_2=\widetilde{\mathbf{A}}_{3c}\,\widetilde{\mathbf{A}}_4, \tag{2.173}$$

где $\widetilde{\mathbf{A}}_{1c}=(R,\ G,\ B);\quad \widetilde{\mathbf{A}}_{3c}\quad (X,\ Y,\ Z).$ (2.174)

Из сравнения (2.172) и (2.101) следует

$$\widetilde{\mathbf{A}}_2=\widetilde{\mathbf{M}}\,\widetilde{\mathbf{A}}_4. \tag{2.175}$$

Подставив (2.175) в (2.173), получим

$$\widetilde{\mathbf{A}}_{1c}\widetilde{\mathbf{M}}\,\widetilde{\mathbf{A}}_4=\widetilde{\mathbf{A}}_{3c}\,\widetilde{\mathbf{A}}_4;\quad \text{т. е. }\ \widetilde{\mathbf{A}}_{1c}\,\widetilde{\mathbf{M}}=\widetilde{\mathbf{A}}_{3c}. \tag{2.176}$$

Умножая обе части (2.176) на $\widetilde{\mathbf{M}}^{-1}$ и помня, что $\widetilde{\mathbf{M}}\,\widetilde{\mathbf{M}}^{-1}\quad 1$, имеем

$$\widetilde{\mathbf{A}}_{1c}=\widetilde{\mathbf{A}}_{3c}\,\widetilde{\mathbf{M}}^{-1}. \tag{2.177}$$

Из теории матриц известны следующие формулы:

$$\widetilde{\mathbf{A}}_c^{-1}=(\widetilde{\mathbf{A}}^{-1})_c;\quad (\widetilde{\mathbf{A}}\,\widetilde{\mathbf{B}})_c\quad \widetilde{\mathbf{B}}_c\,\widetilde{\mathbf{A}}_c;$$

$$(\widetilde{\mathbf{C}}\,\widetilde{\mathbf{B}}\,\widetilde{\mathbf{A}})_c\quad \widetilde{\mathbf{A}}_c\,\widetilde{\mathbf{B}}_c\,\widetilde{\mathbf{C}}_c;\quad (\widetilde{\mathbf{A}}_c)_c=\widetilde{\mathbf{A}}. \tag{2.178}$$

На основании этих формул можно записать

$$\widetilde{\mathbf{A}}_1=(\widetilde{\mathbf{A}}_{1c})_c\quad (\widetilde{\mathbf{A}}_{3c}\,\widetilde{\mathbf{M}}^{-1})_c\quad \widetilde{\mathbf{M}}_c^{-1}\,\widetilde{\mathbf{A}}_3, \tag{2.179}$$

что аналогично (2.165)

Для удобства дальнейшего использования преобразуем (2.162) так, чтобы получить в явном виде зависимость $X,\ Y,\ Z$ от $R,\ G,\ B$ через $r,\ g,\ b$ (с индексами $X,\ Y,\ Z$) и $r_э,\ g_э,\ b_э$. Для этого, зная элементы матрицы $\widetilde{\mathbf{F}}$ из (2.125) и пользуясь (2.74), находим элементы матрицы $\widetilde{\mathbf{F}}^{-1}$ из (2.128):

$$\begin{aligned}
&x'_{(R)}\quad (1\ D)\,(g_Y\,b_Z-g_Z\,b_Y);\quad y'_{(R)}\quad (1\ D)\,(g_Z\,b_X-g_X\,b_Z),\\
&z'_{(R)}\ -(1\ D)\,(g_X\,b_Y-g_Y\,b_X),\\
&x'_{(G)}\quad (1\ D)\,(r_Z\,b_Y-r_Y\,b_Z);\quad y'_{(G)}\quad (1\ D)\,(r_X\,b_Z-r_Z\,b_X);\\
&z'_{(G)}-(1\ D)\,(r_Y\,b_X-r_X\,b_Y),\\
&x'_{(B)}-(1\ D)\,(r_Y\,g_Z-r_Z\,g_Y);\quad y'_{(B)}\quad (1\ D)\,(r_Z\,g_X\quad r_X\,g_Z),\\
&z'_{(B)}\quad (1/D)\,(r_X\,g_Y\quad r_Y\,g_X),
\end{aligned} \tag{2.180}$$

где D — определитель, аналогичный (2.75).

Эталонный цвет $Ц_э$ делаем равностимульным в системе XYZ, так что $x_э$ $y_э=z_э\quad 1/3$. Подставляя $\delta_1,\ \delta_2,\ \delta_3$ из (2.140), а также (2.141) в (2.144), находим модули:

$$\begin{aligned}
&m_{(X)}-(1/3)/(r_э\,x'_{(R)}-g_э\,x'_{(G)}+b_э\,x'_{(B)});\\
&m_{(Y)}\ -(1/3)/(r_э\,y'_{(R)}\ g_э\,y'_{(G)}+b_э\,y'_{(B)});\\
&m_{(Z)}-(1/3)/(r_э\,z'_{(R)}\quad g_э\,z'_{(G)}\quad b_э\,z'_{(B)}).
\end{aligned} \tag{2.181}$$

Подставив (2.180) в (2.181), получим

$$m_{(X)} = (D\ 3)/[r_3 (g_Y b_Z - g_Z b_Y) + g_3 (r_Z b_Y - r_Y b_Z) + b_3 (r_Y g_Z - r_Z g_Y)];$$

$$m_{(Y)} = (D\ 3)/[r_3 (g_Z b_X - g_X b_Z) + g_3 (r_X b_Z - r_Z b_X) + b_3 (r_Z g_X - r_X g_Z)];$$

$$m_{(Z)} = (D\ 3)\ [r_3 (g_X b_Y - g_Y b_X) + g_3 (r_Y b_X - r_X b_Y) +$$

$$+ b_3 (r_X g_Y - r_Y g_X)]. \qquad (2.182)$$

Из (2.98), (2.160) и (2.144) имеем

$$X = m_{(X)} (x'_{(R)} R + x'_{(G)} G + x'_{(B)} B),$$

$$Y = m_{(Y)} (y'_{(R)} R + x'_{(G)} G + y'_{(B)} B),$$

$$Z = m_{(Z)} (z'_{(R)} R + z'_{(G)} G + z'_{(B)} B). \qquad (2.183)$$

Подставив (2.180) и (2.182) в (2.183), получим

$$X = [1/(3D_1)]\,[(g_Y b_Z - g_Z b_Y) R + (r_Z b_Y - r_Y b_Z) G + (r_Y g_Z - r_Z g_Y) B];$$

$$Y = [1/(3D_2)]\,[(g_Z b_X - g_X b_Z) R + (r_X b_Z - r_Z b_X) G + (r_Z g_X - r_X g_Z) B];$$

$$Z = [1/(3D_3)]\,[(g_X b_Y - g_Y b_X) R + (r_Y b_X - r_X b_Y) G + (r_X g_Y - r_Y g_X)]; \qquad (2.184)$$

$$D_1 = r_3 (g_Y b_Z - g_Z b_Y) + g_3 (r_Z b_Y - r_Y b_Z) + b_3 (r_Y g_Z - r_Z g_Y)$$

$$D_2 = r_3 (g_Z b_X - g_X b_Z) + g_3 (r_X b_Z - r_Z b_X) + b_3 (r_Z g_X - r_X g_Z),$$

$$D_3 = r_3 (g_X b_Y - g_Y b_X) + g_3 (r_Y b_X - r_X b_Y) + b_3 (r_X g_Y - r_Y g_X). \qquad (2.185)$$

В (2.184) множители перед R, G, B — элементы матрицы $\tilde{\mathbf{M}}_c$.
В матрице (2.166) средняя строка

$$G = Y'_{(R)} X + Y'_{(G)} Y + Y'_{(B)} Z. \qquad (2.186)$$

Для равностимульного цвета $Ц_р$ в системе XYZ имеем $X = Y = Z$ и из (2.186) для него получим

$$Y'_{(R)} + Y'_{(G)} + Y'_{(B)} = A'. \qquad (2.187)$$

Если разделить на A' все строки матрицы (2.166), то при $X = Y = Z$ = 1 получим

$$G_р = (1/A')\,(Y'_{(R)} + Y'_{(G)} + Y'_{(B)}). \qquad (2.188)$$

Введем новые матрицы $\tilde{\mathbf{A}}_0^{-1}$ и $\tilde{\mathbf{A}}_0$. Из (2.166) и (2.162) получаем

$$\tilde{\mathbf{A}}_0^{-1} = \tilde{\mathbf{M}}_c^{-1} A' = \frac{1}{A'} \begin{pmatrix} X'_{(R)} & X'_{(G)} & X'_{(B)} \\ Y'_{(R)} & Y'_{(G)} & Y'_{(B)} \\ Z'_{(R)} & Z'_{(G)} & Z'_{(B)} \end{pmatrix} \qquad (2.189)$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_0 = A' \tilde{\mathbf{M}}_c = A' \begin{pmatrix} X_{(R)} & X_{(G)} & X_{(B)} \\ Y_{(R)} & Y_{(G)} & Y_{(B)} \\ Z_{(R)} & Z_{(G)} & Z_{(B)} \end{pmatrix}, \qquad (2.190)$$

где

$$(X, Y, Z) = \tilde{\mathbf{A}}_0 (R, G, B), \qquad (2.191)$$

$$(R, G, B) = \tilde{\mathbf{A}}_0^{-1} (X, Y, Z). \qquad (2.192)$$

Соотношение между координатами цвета $X\,Y\,Z$ цвета $Ц$ в системе XYZ и модулями m_X, m_Y, m_Z основных цветов X, Y, Z в системе RGB для цвета Ц. Подставив Y'_R, Y'_G, Y'_B из (2.167) в (2.187), получим

$$A' \quad \frac{d}{D' m_{(X)}} + \frac{e}{D' m_{(Y)}} + \frac{f}{D' m_{(Z)}}, \tag{2.193}$$

где d, e, f взяты из (2.168). Найдем произведение $A' m_{(X)}$, используя (2.193), (2.168), (2.140) и (2.144): $m_{(X)}/m_{(Y)} \quad x_э\delta_2 / (y_э\delta_1) \quad \delta_2/\delta_1$; $m_{(X)}/m_{(Z)} \quad x_э\delta_3/(z_э\delta_1) \quad \delta_3/\delta_1$, так как на основании (2.141) $x_э \quad y_э = z_э \quad 1/3$. Это дает

$$A' m_{(X)} = -(1/D')\{(-y'_{(R)} z'_{(B)} + y'_{(B)} z'_{(R)}) +$$
$$+ |(x'_{(R)} z'_{(B)} - x'_{(B)} z'_{(R)})(r_э y'_{(R)} + g_э y'_{(G)} + b_э y'_{(B)})/N| +$$
$$+ (-x'_{(R)} y'_{(B)} + x'_{(B)} y'_{(R)})(r_э z'_{(R)} + g_э z'_{(G)} + b_э z'_{(B)})\ N\}.$$
$$N = -r_э x'_{(R)} + g_э x'_{(G)} + b_э x'_{(B)}. \tag{2.194}$$

Приведя (2.194) к общему знаменателю и подставив сюда $x_э \quad y_э = z_э \quad 1/3$ из (2.141), получим после простых преобразований

$$A' m_{(X)} \quad g_э/N = 1/|(r_э\ g_э)\, x'_{(R)} + x'_{(G)} + (b_э/g_э)\, x'_{(B)}|. \tag{2.195}$$

Обозначим

$$r_э\ g_э = R_э/G_э = f_1; \quad b_э/g_э = B_э/G_э = f_2. \tag{2.196}$$

Тогда получим из (2.195) для $A' m_{(X)}$ и по аналогии для $A' m_{(Y)}$ и $A' m_{(Z)}$:

$$A' m_{(X)} \quad 1/(f_1 x'_{(R)} + x'_{(G)} + f_2 x'_{(B)}),$$
$$A' m_{(Y)} = 1/(f_1 y'_{(R)} + y'_{(G)} + f_2 y'_{(B)}),$$
$$A' m_{(Z)} = 1/(f_1 z'_{(R)} + z'_{(G)} + f_2 z'_{(B)}). \tag{2.197}$$

Подставив (2.163) в (2.190) и полученный результат в (2.197), имеем из (2.191):

$$X = (x'_{(R)} R + x'_{(G)} G + x'_{(B)} B)/(f_1 x'_{(R)} \quad x'_{(G)} + f_2 x'_{(B)}),$$
$$Y = (y'_{(R)} R + y'_{(G)} G \quad y'_{(B)} B)/(f_1 y'_{(R)} \quad y'_{(G)} + f_2 y'_{(B)}).$$
$$Z \quad (z'_{(R)} R + z'_{(G)} G \quad z'_{(B)} B)/(f_1 z'_{(R)} + z'_{(G)} + f_2 z'_{(B)}). \tag{2.198}$$

В системе RGB для цветов X, Y, Z, смесь которых образует цвет $Ц$ с координатами цвета R, G, B, имеем из (2.134) и (2.128) модули:

$$m_X = x'_{(R)} R + x'_{(G)} G + x'_{(B)} B, \quad m_Y = y'_{(R)} R + y'_{(G)} G + y'_{(B)} B,$$
$$m_Z \quad z'_{(R)} R + z'_{(G)} G + y'_{(B)} B. \tag{2.199}$$

Подставив (2.199) в числитель (2.198), имеем:

$$X = m_X/(f_1 x'_{(R)} + x'_{(G)} + f_2 x'_{(B)}), \quad Y = m_Y/(f_1 y'_{(R)} + y'_{(G)} + f_2 y'_{(B)}),$$
$$Z = m_Z/(f_1 z'_{(R)} + z'_{(G)} + f_2 z'_{(B)}). \tag{2.200}$$

Это и есть искомое выражение, в котором x', y', z' с индексами (R), (G), (B) определяются из (2.128) и (2.180). Вместо (2.199) можно получить более удобное для расчетов выражение, если преобразовать (2.199), добавив:

к первой строке $(f_1 x'_{(R)} + f_2 x'_{(B)})\,G - (f_1 x'_{(R)} + f_2 x'_{(B)})\,G$,

ко второй строке $(f_1 y'_{(R)} + f_2 y'_{(B)})\,G - (f_1 y'_{(R)} + f_2 y'_{(B)})\,G$,

к третьей строке $(f_1 z'_{(R)} + f_2 z'_{(B)})\,G - (f_1 z'_{(R)} + f_2 z'_{(B)})\,G$.

Эти добавляемые выражения равны нулю. Тогда получим:

$$\begin{aligned}
m_X &= x'_{(R)}(R - f_1 G) + (f_1 x'_{(R)} + x'_{(G)} + f_2 x'_{(B)})\,G + x'_{(B)}(B - f_2 G),\\
m_Y &= y'_{(R)}(R - f_1 G) + (f_1 y'_{(R)} + y'_{(G)} + f_2 y'_{(B)})\,G + y'_{(B)}(B - f_2 G),\\
m_Z &= z'_{(R)}(R - f_1 G) + (f_1 z'_{(R)} + z'_{(G)} + f_2 z'_{(B)})\,G + z'_{(B)}(B - f_2 G). \qquad (2.201)
\end{aligned}$$

Подставив (2.201) в (2.200), получим:

$$\begin{aligned}
X &= G + \frac{x'_{(R)}(R - f_1 G) + x'_{(B)}(B - f_2 G)}{f_1 x'_{(R)} + x'_{(G)} + f_2 x'_{(B)}}\,G + p_1(R - f_1 G) +\\
&+ q_1(B - f_2 G),\\
Y &= G + \frac{y'_{(R)}(R - f_1 G) + y'_{(B)}(B - f_2 G)}{f_1 y'_{(R)} + y'_{(G)} + f_2 y'_{(B)}}\,G + p_2(R - f_1 G) +\\
&+ q_2(B - f_2 G),\\
Z &= G + \frac{z'_{(R)}(R - f_1 G) + z'_{(B)}(B - f_2 G)}{f_1 z'_{(R)} + z'_{(G)} + f_2 z'_{(B)}}\,G + p_3(R - f_1 G) +\\
&+ q_3(B - f_2 G), \qquad (2.202)
\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
&p_1 = x'_{(R)}\,a_1;\ p_2 = y'_{(R)}\,a_2;\ p_3 = z'_{(R)}/a_3;\ q_1 = x'_{(B)}/a_1;\ q_2 = y'_{(B)}\,a_2;\\
&q_3 = z'_{(B)}\,a_3;\ a_1 = f_1 x'_{(R)} + x'_{(G)} + f_2 x'_{(B)};\ a_2 = f_1 y'_{(R)} + y'_{(G)} + f_2 y'_{(B)};\\
&a_3 = f_1 z'_{(R)} + z'_{(G)} + f_2 z'_{(B)}. \qquad (2.203)
\end{aligned}$$

На эталонном равностимульном цвете $Ц_э$ имеем $R = R_э$; $G = G_э$, $B = B_э$, отсюда

$$R - f_1 G = R_э - f_1 G_э;\quad B - f_2 G = B_э - f_2 G_э. \qquad (2.204)$$

2.9. ПРОЕКТИВНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КООРДИНАТ ЦВЕТНОСТИ В ЦВЕТОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Как было показано в § 2.8, преобразования единичных количеств основных цветов из системы XYZ в систему RGB и обратно матрицы $\tilde{\mathbf{G}}$, $\tilde{\mathbf{L}}$, $\tilde{\mathbf{M}}$, $\tilde{\mathbf{S}}$, $\tilde{\mathbf{R}}$ и обратные им), а также преобразование координат цвета $Ц$ (матрицы $\tilde{\mathbf{M}}_c$ и $\tilde{\mathbf{M}}_c^{-1}$) являются линейными. Рассмотрим

преобразованне координат цветности цвета $Ц$ и покажем, что это преобразование является *проективным* (дробно-линейным).

Определим координаты цветности цвета $Ц$ в системе XYZ по известным координатам цветности этого цвета в системе RGB. Заданы (известны) координаты цветности r, g, b цвета $Ц$ в системе RGB. Требуется найти его координаты цветности x, y, z в системе XYZ. Образуя сумму $X + Y + Z$ из (2.160), получим модуль цвета $Ц$ в системе XYZ:

$$X + Y + Z = \sigma_1 R + \sigma_2 G + \sigma_3 B, \tag{2.205}$$

где σ_1, σ_2, σ_3 находим, группируя коэффициенты при R, G, B при получении (2.205):

$$\sigma_1 = \frac{x_э}{\delta_1} x'_{(R)} + \frac{y_э}{\delta_2} y'_{(R)} + \frac{z_э}{\delta_3} z'_{(R)} = X_{(R)} + Y_{(R)} + Z_{(R)} = m_{(R)};$$

$$\sigma_2 = \frac{y_э}{\delta_1} x'_{(G)} + \frac{y_э}{\delta_2} y'_{(G)} + \frac{z_э}{\delta_3} z'_{(G)} = X_{(G)} + Y_{(G)} + Z_{(G)} = m_{(G)};$$

$$\sigma_3 = \frac{x_э}{\delta_1} x'_{(B)} + \frac{y_э}{\delta_2} y'_{(B)} + \frac{z_э}{\delta_3} z'_{(B)} = X_{(B)} + Y_{(B)} + Z_{(B)} = m_{(B)}. \tag{2.206}$$

Координаты цветности цвета $Ц$ в системе XYZ находим через его модуль из выражений, аналогичных (2.23):

$$x = X/(X + Y + Z) = (X_{(R)} R + X_{(G)} G + X_{(B)} B)/P_1;$$

$$y = Y/(X + Y + Z) = (Y_{(R)} R + Y_{(G)} G + Y_{(B)} B)/P_1;$$

$$z = Z/(X + Y + Z) = (Z_{(R)} R + Z_{(G)} G + Z_{(B)} B)/P_1;$$

$$P_1 = \sigma_1 R + \sigma_2 G + \sigma_3 B, \tag{2.207}$$

где X, Y, Z с индексами (R), (G), (B) определены в (2.153).

Разделив числитель и знаменатель правой части каждого из выражений (2.207) на сумму $R + G + B$, получим:

$$x = (X_{(R)} r + X_{(G)} g + X_{(B)} b)/P_2; \quad y = (Y_{(R)} r + Y_{(G)} g + Y_{(B)} b)/P_2;$$

$$z = (Z_{(R)} r + Z_{(G)} g + Z_{(B)} b)/P_2;$$

$$P_2 = \sigma_1 r + \sigma_2 g + \sigma_3 b. \tag{2.208}$$

В правой части (2.208) координаты цветности r, g, b входят не только в числитель, но и в знаменатель. Поэтому связь между x, y, z и r, g, b не линейная, а дробно-линейная и преобразование (2.208) является проективным. Выражение (2.208) можно преобразовать, подставив в него $b = 1 - (r + g)$.

Теперь найдем зависимость r, g, b от x, y, z.

Для этого, разделив обе частн (2.164) на сумму $X + Y + Z$, используя левую часть (2.207), получнм:

$$R/(X+Y+Z) = X'_{(R)}\,x + X'_{(G)}\,y + X'_{(B)}\,z = C_1,$$
$$G/(X+Y+Z) = Y'_{(R)}\,x + Y'_{(G)}\,y + Y'_{(B)}\,z = C_2,$$
$$B/(X+Y+Z) = Z'_{(R)}\,x + Z'_{(G)}\,y + Z'_{(B)}\,z = C_3. \qquad (2.209)$$

Отсюда на основании (2.23), используя (2.209), нмеем

$$r = R/(R+G+B) = C_1/(C_1+C_2+C_3),$$
$$g = G/(R+G+B) = C_2/(C_1+C_2+C_3),$$
$$b = B/(R+G+B) = C_3/(C_1+C_2+C_3). \qquad (2.210)$$

Подставнв сюда C_1, C_2, C_3, из (2.209) получим

$$r = (X'_{(R)}\,x + X'_{(G)}\,y + X'_{(B)}\,z)/P_3;\quad g = (Y'_{(R)}\,x + Y'_{(G)}\,y + Y'_{(B)}\,z)/P_3;$$
$$b = (Z'_{(R)}\,x + Z'_{(G)}\,y + Z'_{(B)}\,z)/P_3;$$
$$P_3 = \sigma'_1\,x + \sigma'_2\,y + \sigma'_3\,z, \qquad (2.211)$$

где $\sigma'_1 = X'_{(R)} + Y'_{(R)} + Z'_{(R)}$, $\sigma'_2 = X'_{(G)} + Y'_{(G)} + Z'_{(G)}$,

$$\sigma'_3 = X'_{(B)} + Y'_{(B)} + Z'_{(B)}. \qquad (2.212)$$

Значения X', Y', Z' с нндексамн (R), (G), (B) можно определить по (2.167). Выраженне (2.211) можно преобразовать, подставив в него $z = 1 - (x + y)$.

При проективном преобразовании можно обратить точкн с конечнымн координатами цветности r, g в точкн с координатамн цветности x, y, расположенными на бесконечности, и наоборот, н благодаря этому создать большне нзменения в форме преобразуемой фигуры. Переход к бесконечности происходит при знаменателе в (2.208) или (2.211), равном нулю. В этом случае знаменатель представляет собой уравнение прямой в плоскости r, g для (2.208), которой соответствует прямая в плоскостн x, y на бесконечности. При проективном преобразованнн точки, находящнеся внутрн фигуры, могут переходить в точки вне этой фигуры, и наоборот.

2.10. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЦВЕТНОСТИ НА ПЛОСКОСТИ

Диаграмма цветкостей. Точкн пересечення единичных векторов (ортов) основных цветов R, G, B с единнчной плоскостью отображают *цветности* этих цветов. Соеднив этн точкн прямыми, получим цветовой треугольник RGB (рнс. 2.17). Его вершины представляют собой еднннчные колнчества основных цветов и должны быть обозначены (R), (G), (B).

Единнчная плоскость представляет собой хроматнческую днаграмму, называемую также диаграммой цветностей (или цветовым графиком). Если орты основных цветов взаимно ортогональны и нмеют одннаковую

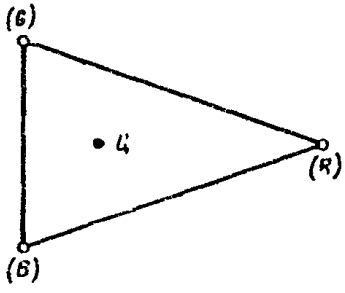


Рис. 2.17 Цветовой треугольник *RGB*

геометрическую длину, что является частным случаем, то треугольник *GRB* в единичной плоскости является равносторонним. Любая цветность с насыщенностью, меньшей, чем насыщенность основных цветов *R*, *G*, *B*, может быть согласована смесью положительных количеств этих трех цветов и изображается точкой внутри цветового треугольника *RGB*. Цветность с насыщенностью, большей, чем насыщенность основных цветов *R*, *G*, *B*, согласуется колориметрически смесью трех основных цветов, из которых один или два цвета берутся с отрицательным знаком, т. е. добавляются к данному цвету. Поэтому такая цветность изображается точкой, лежащей вне цветового треугольника *RGB*.

Пусть на рис.2.17 точка *Ц* представляет собой цветность смеси трех основных цветов *R*, *G*, *B*, взятых в пропорциях в соответствии с (2.24):

$$(Ц) = r\,(R) + g\,(G) + b(B). \tag{2.213}$$

Как же найти положение точки *Ц* в цветовом треугольнике, если известны ее координаты цветности? Эта задача решается различными способами — методом зональных координат, методом трилинейных координат, методом прямоугольных координат.

Метод зональных координат. На рис. 2.18 точка *Ц* является вершиной трех треугольников *RЦG*, *RЦB*, *GЦB*, площади которых S_1, S_2, S_3 соответственно. Площадь треугольника *RGB*

$$S = S_1 + S_2 + S_3. \tag{2.214}$$

Пусть

$$r = S_1/S = h_1/H_1;\quad g = S_2/S = h_2/H_2;\quad b = S_3/S = h_3/H_3, \tag{2.215}$$

где h_1, h_2, h_3 — перпендикуляры, опущенные из точки *Ц* на стороны треугольника; H_1, H_2, H_3 — перпендикуляры, опущенные из вершин *R*, *G*, *B* на стороны треугольника. Тогда из (2.214) и (2.215) следует $r + g + b = 1$, что аналогично (2.25). Следовательно, относительные значения площадей S_1, S_2, S_3 (относительно *S*) можно рассматривать как координаты цветности *r*, *g*, *b*, называемые *зональными*.

Удобно нанести на треугольник *R*, *G*, *B* сетку прямых, соответствующих постоянным значениям координат цветности *r*, *g*, *b*, т. е. делящих высоты треугольников H_1, H_2, H_3 на части, соответствующие *r*, *g*, *b*. При построении сетки следует учесть следующие обстоятельства. Если вершины треугольника соответствуют единичным количествам основных цветов, то равностимульный цвет $Ц_р$ имеет координаты цветности $r = g = b = 1/3$. С другой стороны, известно, что центр тяжести трех равных масс, помещенных в вершинах любого треугольника, находится

в точке пересечения трех его медиан (удаленной от его сторон на 1/3 длнн медиан), называемый *центроидом*. Напомнпм также, что три высоты треугольнпка пересекаются в одной точке, называемой *ортоцентром*, а перпендикуляры к трем сторонам треугольнпка в их середнпах пересекаются в одной точке, называемой *циклоцентром*.

Еслн точка *Ц* является центрондом (см. рнс. 2.18), то $S_1 = S_2 = S_3 = S/3$ (например, $S_1 = S/3$, поскольку высота h_2, опущенная из точкн *Ц* на сторону *BR*, равна 1/3 высоты, опущенной из точки *G* на эту сторону). Таким образом, для зональных координат равностимульный цвет помещается в центроиде треугольнпка и сетка прямых постоянных значенпй *r*, *g*, *b* является равномерной и параллельной сторонам треугольника, как показано на рнс. 2.19. Здесь прямые, параллельные стороне *BG*, делят на 10 равных частей высоту H_1 нз вершнны *R* и стороны *BR* н *GB*, и на них написаны значения координаты *r*. Аналогично построены прямые, параллельные стороне *BR*, и на нпх написаны значения координаты *g*. Таким же образом построены прямые, параллельные стороне *GR*, делящие высоту H_3 из вершнны *B*, и на них напнсаны значения координаты *b*.

Координаты цветности отсчитывают от стороны треугольника, лежащей протнв вершины, в которой помещен основной цвет, соответствующнй этой координате.

Покажем, что для зональных координат точка *Ц*, изображающая любой цвет, находится в центре тяжестн масс, помещенных в вершнпах цветового треугольника и равных колнчествам основных цветов (в трихроматическнх единицах *T*), необходимых для согласования с цветом *Ц*. Обозначая эти массы *R*, *G*, *B* н равнодействующую массу $m \quad R + G + B$ н помня, что алгебраическая сумма моментов сил (масс) относнтельно выбранной оси равна нулю, можно написать это условне для масс *R*, *G*, *B*, относнтельно осей *BG*, *BR*, *RG* в виде

$$mh_1 = RH_1; \quad mh_2 = GH_2; \quad mh_3 = BH_3, \tag{2.216}$$

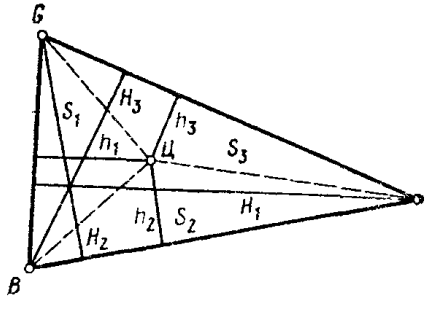


Рис. 2.18. К определению положения точки *Ц* с помощью площадей S_1, S_2, S_3 (метод зональных координат)

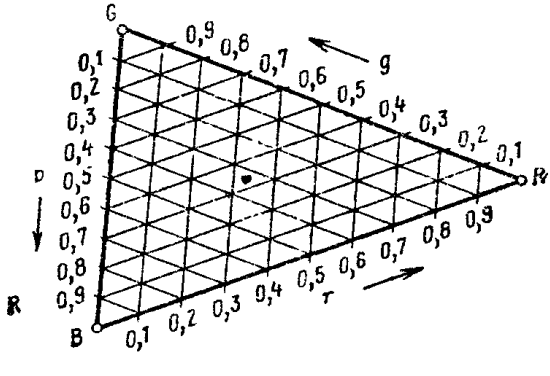


Рис. 2.19 Сетка постоянных значений зональных координат цветности

так как моменты масс R, G, B относнтельно осей, на которых онн лежат, равны нулю. Отсюда

$$\frac{h_1}{H_1}=\frac{R}{m}=\frac{R}{(R+G+B)},\quad \frac{h_2}{H_2}=\frac{G}{m}=\frac{G}{(R+G+B)},$$

$$\frac{h_3}{H_3}=\frac{B}{m}=\frac{B}{(R+G+B)}. \tag{2.217}$$

Сравнивая с (2.23), вндим, что

$$h_1/H_1=r;\quad h_2/H_2=g;\quad h_3/H_3=b, \tag{2.218}$$

т. е. в зональных координатах центр тяжестн совпадает с положением точки, нзображающей цветность.

Координаты цветности r, g, b можно определить не только как отношение высот треугольннков согласно (2.215), но, пользуясь подобием треугольннков, можно (2.215) заменить отношением отрезков прямых, проходящнх через точку $Ц$ нз вершнн треугольников RGB, как показано на рис. 2.20. Тогда

$$r=ЦL/RL;\quad g=ЦP/GP;\quad b=ЦQ/BQ. \tag{2.219}$$

Формулы (2.219) можно использовать для нахождения на цветовом треугольнике точкн $Ц$, координаты цветностн которой r, g, b заданы. В литературе рекомендуется это делать следующим методом: продолжнм сторону BR влево за вершину B, если известны координаты r и g, как показано на рнс. 2.21. Отрезок $BQ=rRB$. На стороне треугольника BG найдем точку P, отложнв отрезок $BP=gGB$. Через точку P проведем прямую, параллельную стороне BR; через точку Q — прямую, параллельную стороне BG. Точка пересечення этих прямых и есть искомая точка $Ц$. Действительно, из рис. 2.21 следует

$$r=ЦP/RB=BQ/RB;\quad g=ЦQ/GB=BP/GB. \tag{2.220}$$

Точка Q лежнт влево от точкн B, если $r<0$, и вправо, если $r>0$. Точка P лежнт выше точкн B, если $g>0$, и ниже, если $g<0$.

Метод трилинейных коодинат. На рнс. 2.22, *а* из точки $Ц$ опущены перпендикуляры h_1, h_2, h_3 на стороны треугольника. Длины сторон треугольника равны a_1, a_2, a_3 соответственно. Здесь h_1, h_2, h_3 являются

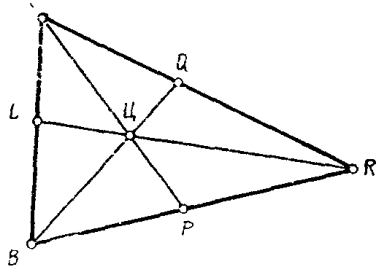


Рис. 2.20. К определению зональных координат цветности через отношение отрезков прямых

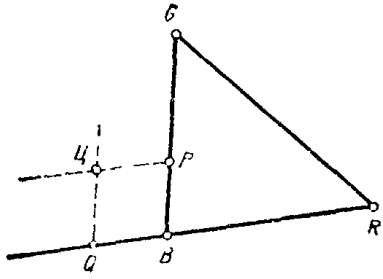


Рис. 2.21. К построенню точки $Ц$ по заданным зональным координатам цветности r и g

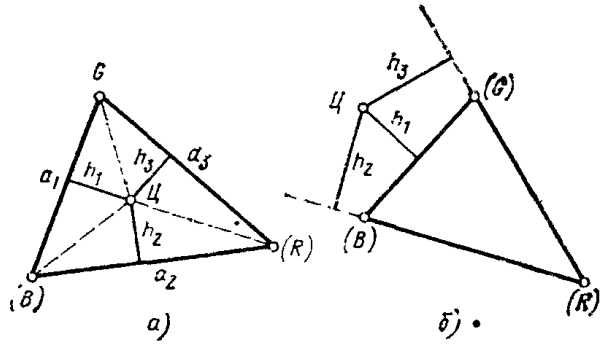


Рис. 2.22. К определенню положения точкн *Ц* с помощью длнн трех перпенднкуляров h_1, h_2, h_3 (метод трилинейных координат)

трилннейнымн координатамн точкн *Ц*. Из сравнення с рнс. 2.18 следует, что $S_1 = 0{,}5\,h_1a_1$; $S_2 \quad 0{,}5\,h_2a_2$; $S_3 = 0{,}5\,h_3a_3$. Тогда

$$h_1a_1 + h_2a_2 + h_3a_3 = 2S. \qquad (2.221)$$

Так как S, a_1, a_2, a_3 заданы, то из (2.221) следует, что h_1, h_2, h_3 связаны друг с другом. Обозначнм

$$r = k_1h_1/D; \quad g = k_2h_2/D; \quad b = k_3h_3/D;$$

$$D = k_1h_1 + k_2h_2 + k_3h_3, \qquad (2.222)$$

где k_1, k_2, k_3 — пронзвольные постояиные.

Из (2.222) следует, что $r + g + b = 1$, т. е. r, g, b можно рассматрнвать как координаты цветности цвета *Ц*. На рис. 2.22, *б* показан случай, когда точка *Ц* лежнт вне треугольннка *RGB*. Прн этом высоты h_2 н h_3 опущены нз нее на продолження сторон треугольника. Высота h_1, лежащая между двумя другимн высотами в угле, меньшем 180°, счнтается отрнцательной.

Из геометрнн нзвестно, что если треугольнк равносторонний, то сумма трех перпендикуляров, опущенных на его стороны нз любой точкн в этом треугольннке, есть велнчнна постоянная (эту велнчниу можно прннять за единицу).

Для построения сетки прямых с постояннымн значеннямн r, g, b необходимо выбрать коэффнцненты k_1, k_2, k_3 в (2.222). Более простым является графнческий способ, пригодный как для случая, когда равностнмульный цвет совпадает с центрондом треугольннка, так и когда такого совпадення нет. Последнее может нметь место, если еднпнчные колнчества основных цветов выбраны так, что нх смесь дает равностимульную цветность, не совпадающую с центрондом цветового треугольника. В этом случае сетка прямых будет неравномерной. Для построения сетки проводнм нз вершины треугольннка *RGB* через точку равностнмульного цвета $Ц_р$ (рнс. 2.23) прямые, пересекающне его стороны в точках *L*, *M*, *N*. Такнм образом, получаем два треугольннка — RGB н LMN. Вершнны *R* н *L*, *G* н *M*, *B* н *N* треугольнников *RGB* н *LMN*, соедннены прямымн, пересекающнмнся в одной точке $Ц_р$. В проективной геометрни нмеется *теорема Дезарга* о двух треугольниках (см.рис. 2.24),

которая гласит: если прямые, соединяющие соответственные вершины A и A', B и B', C и C' двух треугольников, проходят через одну точку S, то соответственные стороны этих треугольников (AB и $A'B'$, AC и $A'C'$, BC и $B'C'$) пересекаются в трех точках (A_0, B_0, C_0), лежащих на одной прямой. Эта прямая называется *осью перспективы xx*. На рис. 2.24 показаны треугольники ABC и $A'B'C'$, подчиняющиеся теореме Дезарга. Прямая xx — ось перспективы. Следовательно, на предыдущем рисунке (см. рис. 2.23) соответственные стороны GB и MN, RB и LN, RG и LM двух треугольников RGB и LMN пересекаются в трех точках P_1, P_2, P_3, лежащих на одной прямой, являющейся осью перспективы xx. В точках L, M, N значения $b = r = g = 0{,}5$. Действительно, например, на стороне RG координата цветности $b = 0$ и $(N) = r\,(R) + g\,(G)$, где $r + g = 1$, причем $r = g$, так как

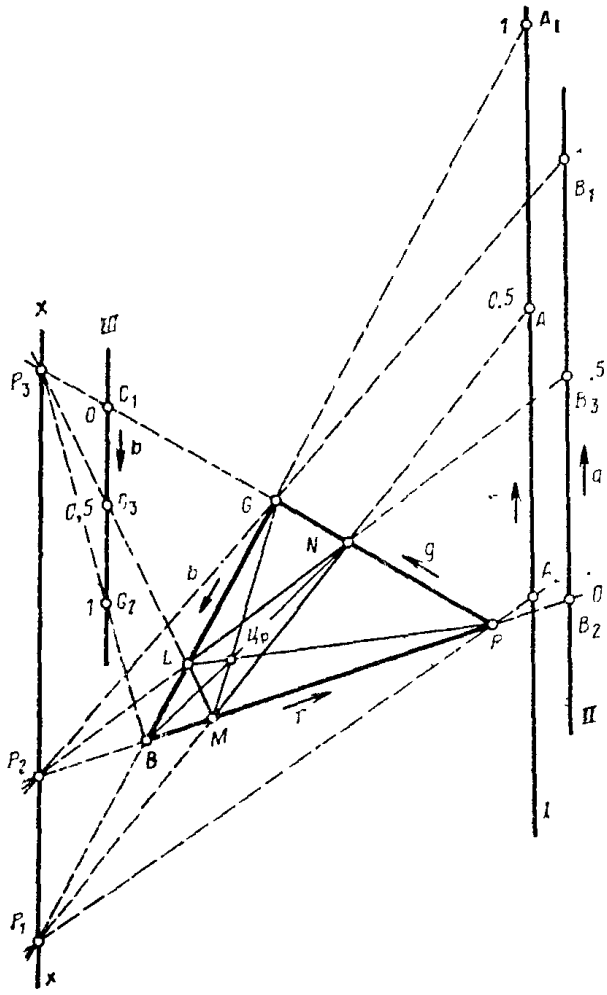


Рис. 2.23. К построению сетки координат цветности при несовпадении равностимульного цвета $Ц_р$ с центроидом треугольника RGB (нахождение точек A_3, B_2, C с помощью теоремы Дезарга)

цвета R и G взяты в одинаковых количествах (цвет N заменяет сумму $R + G$ при получении $Ц_р$, т. е. $N + B = Ц_р$). Следовательно, $g = 0{,}5$ в точке N. Аналогично $r = 0{,}5$ в точке M и $b = 0{,}5$ в точке L. Четырехугольник $BLNR$ (рис. 2.23) называется *полным*, так как он образован четырьмя точками B, L, N, R (из них никакие три не лежат на одной прямой), называемыми *вершинами*, и шестью прямыми BL, LN, NR, RB, BN, LR, называемыми *сторонами* и определяемыми вершинами. Точки пересечения противоположных сторон P_2, G, $Ц_р$ (т. е. сторон, не проходящих через одну и ту же вершину) или их продолжений называются *диагональными точками*. Прямые, соединяющие диагональные точки, называются *диагоналями полного четырехугольника* (прямые P_2G, $P_2Ц_р$, $Ц_рG$) и образуют диагональный треугольник $P_2Ц_рG$.

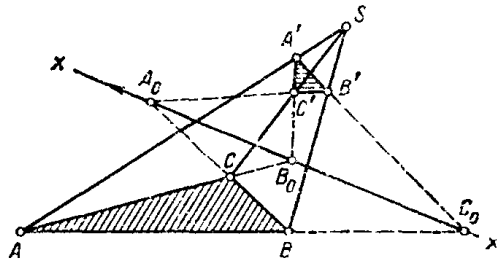


Рис. 2.24. К пояснению теоремы Дезарга для двух треугольников, расположенных в одной плоскости

Если для точек M_1, M_2, M_3, M_4, лежащих на одной прямой, *двойное (ангармоническое* или *сложное*) отношение равно минус единице, например $(M_1M_3M_2M_4) = -1$, то такие точки называют *гармонически расположенными*, а пучок прямых, проходящих через них из центра S, называется *гармоническим* (понятие двойного отношения четырех точек прямой рассматривается в гл. 3 (см. (3.90)... (3.101)). В проективной геометрии существует следующая теорема: на каждой стороне полного четырехугольника пара вершин, диагональная точка и точка пересечения этой стороны с диагональю, проходящей через две другие диагональные точки, образуют *гармоническую четверку точек*.

Отсюда следует, что $(BRP_2M) = (P_2MBR) = -1$ для точек P_2, M, B, R стороны RB полного четырехугольника $BLNR$ (см. рис. 2.23), где B и R — пара вершин, P_2 — диагональная точка, лежащая на стороне BR, M — точка пересечения стороны BR, диагональю $Ц_рG$, проходящей через две другие диагональные точки ($Ц_р$ и G). Так как точки P_2, B, M, R принадлежат пучку прямых, исходящих из точки P_3, то этот пучок является гармоническим.

Построим прямую, параллельную одной из прямых пучка, исходящего из точки P_3 (см. рис. 2.23), например, прямую III, параллельную прямой P_3P_2, которая пересечет пучок прямых, исходящих из точки P_3 в точках C_1, C_3, C_2, M_∞, где M_∞ — несобственная точка прямой III (т. е. лежащая в бесконечности), принадлежащая прямым P_3P_2 и III (так как они пересекаются в бесконечно далекой точке M_∞). В этом случае справедливо для двойного отношения четырех точек $(C_1C_2C_3M_\infty) = C_1C_3/C_2C_3 : C_1M_\infty/C_2M_\infty = C_1C_3/C_2C_3$, так как $C_1M_\infty/C_2M_\infty = 1$. Но точки C_1, C_2, C_3, M_∞ лежат на прямой, пересекающей гармонический пучок прямых, исходящих из точки P_3. Поэтому они также являются гармонически расположенными и для

них справедливо $(C_1C_2C_3M_\infty) = -1$. Отсюда следует, что $C_1C_3/C_2C_3 = -1$, т. е. $C_1C_3 = C_2C_3$. Следовательно, точка C_3 является серединой отрезка C_1C_2 на прямой *III* и ей соответствует точка L с координатой $b = 0{,}5$ (в точке C_3 имеем также $b = 0{,}5$).

Из вышеизложенного следует, что точки, соответственные точкам на стороне BG с координатами b, равными 0; 0,1; 0,2;. .; 1, распределяются на прямой *III* равномерно (на стороне BG эти точки распределены неравномерно, если точка L не является серединой отрезка BG). Таким образом, для построения на стороне BG шкалы координат b достаточно построить на отрезке C_1C_2 равномерную шкалу (например, разделив отрезок C_1C_2 на 10 равных частей) и спроектировать ее из центра P_3 на прямую BG.

Пучок прямых P_1P_3, P_1G, P_1N, P_1R, исходящих из точки P_1, является гармоническим, так как эти прямые проходят через гармонически расположенные точки P_2, B, M, R. Поскольку прямая P_3R пересекает этот пучок, то точки P_3, G, N, R гармонически расположенные и для них справедливо $(P_3NGR) = -1$. Поэтому пучок прямых P_2P_3, P_2G, P_2N, P_2R, исходящих из точки P_2, также является гармоническим. Вследствие гармоничности $(P_3NGR) = -1$, точка B_3 на прямой *II*, параллельной прямой P_3P_2, является серединой отрезка B_1B_2 и ей соответствует точка N с координатой $g = 0{,}5$. Таким образом, для построения шкалы координаты g на стороне RG достаточно построить на отрезке B_1B_2 равномерную шкалу и спроектировать ее из центра P_2 на прямую RG. Аналогично предыдущему, вследствие гармоничности $(P_3NGR) = -1$, точка A_3 на прямой *I*, параллельной прямой P_1P_2, является серединой отрезка A_1A_2, и ей соответствует точка M с координатой $r = 0{,}5$. Для построения шкалы координаты r на стороне BR достаточно построить на отрезке A_1A_2 равномерную шкалу и спроектировать ее из центра P_1 на прямую BR. В результате сказанного выше,

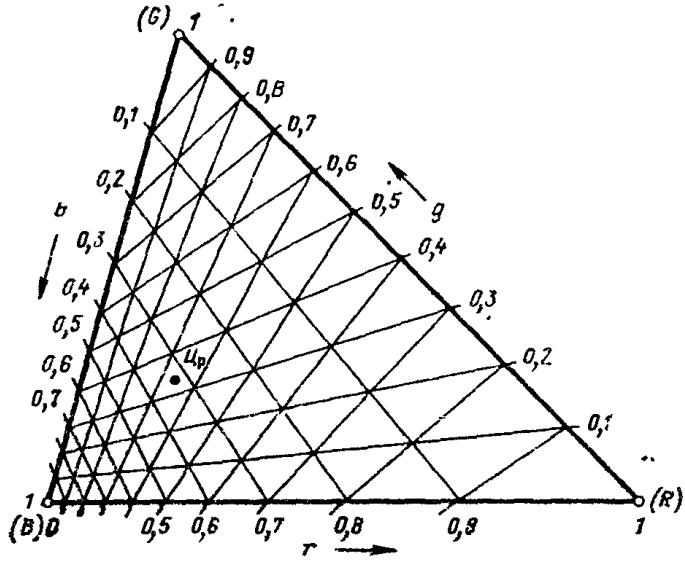


Рис. 2.25. Сетка координат цветности на треугольнике основных цветов RGB, когда равностимульный цвет $Ц_р$ не совпадает с центроидом

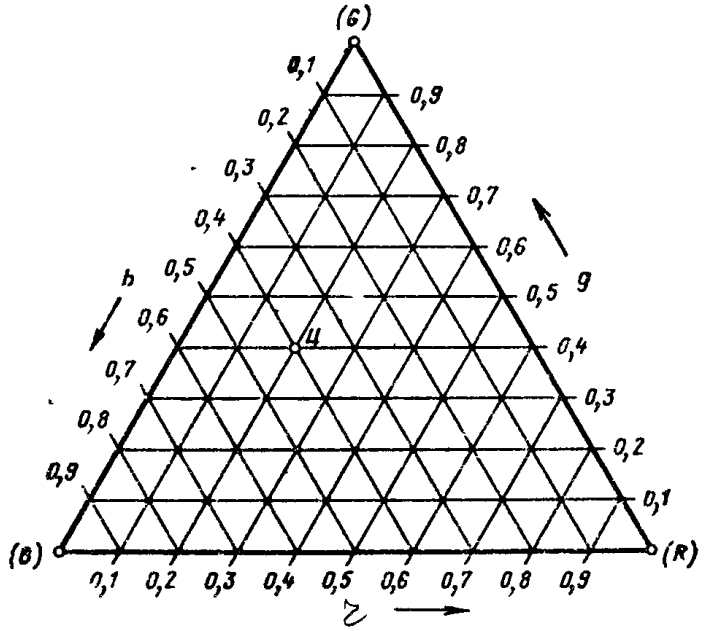


Рис. 2.26. Сетка координат цветности в равностороннем треугольнике основных цветов *RGB*

линия MN соответствует $r = 0{,}5$; линия LN соответствует $g = 0{,}5$; линия ML соответствует $b = 0{,}5$.

Пучок прямых, выходящих из точки P_1, пересекает стороны треугольника, исходящие из вершины R, и его прямые соответствуют постоянным значениям координаты r. Пучок прямых, выходящих из точки P_2, пересекает стороны треугольника, исходящие из вершины G, и его прямые соответствуют постоянным значениям координаты g. Пучок прямых, выходящий из точки P_3, пересекает стороны треугольника, исходящие из вершины B, и его прямые соответствуют постоянным значениям координаты b.

На сторонах треугольника *RGB* эти три пучка образуют шкалы координат r, g, b. На рис. 2.25 показан цветовой треугольник с нанесенной на него описанным способом сеткой координат цветности. Здесь в каждой точке $r + g + b = 1$.

Если треугольник *RGB* равносторонний, то $a_1 = a_2 = a_3 = a$. Из (2.221) получим

$$h_1 + h_2 + h_3 = 2S/a = H, \tag{2.223}$$

где H — высота равностороннего треугольника. Если принять $k_1 = k_2 = k_3$, то из (2.222) следует

$$r = \frac{h_1}{H} = \frac{S_1}{S}; \quad g = \frac{h_2}{H} = \frac{S_2}{S}; \quad b = \frac{h_3}{H} = \frac{S_3}{S}. \tag{2.224}$$

Из сравнения (2.224) с (2.215) видно, что трилинейные координаты в этом случае равны зональным.

На рис. 2.26 показан равносторонний треугольник *RGB* с сеткой постоянных значений координат цветности r, g, b и точка $(Ц) = 0{,}2\,(R) +$

$+ 0{,}4\ (G) + 0{,}4\ (B)$. Такой треугольник соответствует (2.224), и образуется основными цветами на единичной плоскости, если орты основных цветов взаимно ортогональны.

При построении сетки координат цветности (см. рис. 2.23) были заданы четыре точки R, G, B, $Ц_р$, по которым найдены ось перспективы и сетка координат цветности. Может быть случай, когда заданы три точки R, G, B и ось перспективы и требуется найти точку $Ц_р$. Для этого следует найти точки P_1, P_2, P_3 пересечения продолжений сторон треугольника основных цветов системы с осью перспективы и далее найти точки 0 и 1 на прямых I, II, III, параллельных оси перспективы (см. рис. 2.23). Затем точки 0,5 на прямых I, II, III соединяем прямыми с точками P_1, P_2, P_3 и таким образом находим точки L, M, N на сторонах треугольника основных цветов системы. Соединяя точки L, M, N с вершинами этого треугольника, находим точку пересечения этих прямых друг с другом. Это и есть точка равноэнергетического цвета $Ц_р$.

Метод прямоугольных координат. От зональных и трилинейных координат цветности r, g, b можно перейти к прямоугольным координатам x и y, если вершину (B) равностороннего треугольника, показанного на рис. 2.26, поместить в начало прямоугольных координат xy, а сторону BR совместить с осью $0x$, как показано на рис. 2.27.

Пусть A — длина сторон треугольника, высота треугольника $H = A\cos 30^\circ = A\sqrt{3}/2$. Для точки $Ц$ координата $y = h_2$. Из (2.215) следует, что $h_2 = gH = gA\sqrt{3}/2$, т. е. $y = gA\sqrt{3}/2$. Для точки $Ц$ координата $x = a_1 + a_2$. Так как линия $ЦF$ параллельна стороне BG, то $a_1 = h_1/\cos 30^\circ = 2h_1/\sqrt{3}$, $a_2 = h_2 \operatorname{tg} 30 = h_2/\sqrt{3}$. Подставив из (2.215) $h_1 = rH = rA\sqrt{3}/2$ и $h_2 = gA\sqrt{3}/2$, получим $x = A(2r + g)/2$. Для упрощения можно положить $A = 1$. Тогда

$$x = 0{,}5/(2r + g);\quad y = 0{,}5g\sqrt{3}. \tag{2.225}$$

Другой метод перехода к прямоугольным координатам состоит в том, что используют (2.25), согласно которому для определения цветности достаточно знать две координаты цветности. Это позволяет применить прямоугольную систему координат для двух координат цветности (рис. 2.28). Из (2.25) следует, что для начала координат третья координата цветности равна единице, так как две другие координаты цветности здесь равны нулю. Одна и та же цветность $Ц$ в этих трех треугольниках занимает различные места. Треугольники, показанные на рис. 2.28, можно считать проекциями (параллельными осям координат)

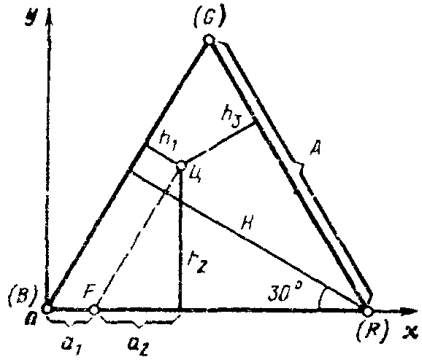


Рис. 2.27. К объяснению перехода от зональных координат к прямоугольным

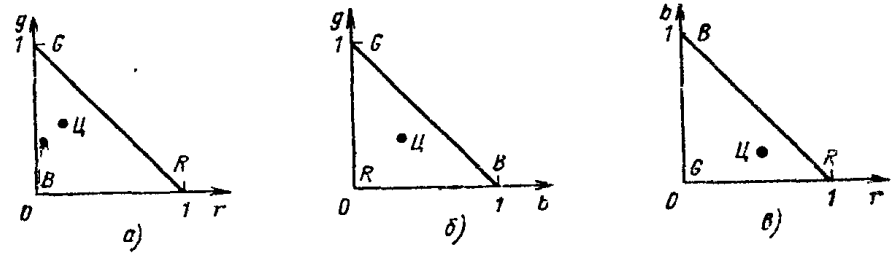


Рис. 2.28. Прямоугольные системы координат цветности

на координатные плоскости в системе взаимортогональных ортов основных цветов треугольника RGB, образованного в единичной плоскости концами этих ортов и являющегося равносторонним.

2.11. КООРДИНАТЫ ЦВЕТА АДДИТИВНОЙ СМЕСИ НЕСКОЛЬКИХ ЦВЕТОВ

Из определения понятия координат цвета (§ 2.4) следует, что если цвет $Ц$ есть аддитивная смесь цветов $Ц_1$, $Ц_2$, $Ц_3$ с координатами цвета (R_1, G_1, B_1), (R_2, G_2, B_2), (R_3, G_3, B_3) в системе RGB, то его координаты $R_Ц$, $G_Ц$, $B_Ц$ равны сумме соответственных координат слагаемых цветов:

$$R_Ц = R_1 + R_2 + R_3; \quad G_Ц = G_1 + G_2 + G_3; \quad B_Ц = B_1 + B_2 + B_3. \tag{2.226}$$

Координаты цветности цвета смеси $Ц$

$$r_Ц = \frac{R_Ц}{m_Ц}; \quad g_Ц = \frac{G_Ц}{m_Ц}; \quad b_Ц = \frac{B_Ц}{m_Ц}, \tag{2.227}$$

где

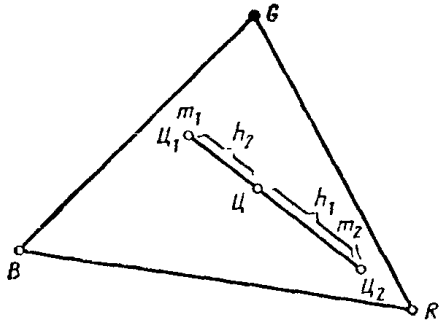
$$m_Ц = R_Ц + G_Ц + B_Ц \quad (R_1 + R_2 + R_3) + (G_1 + G_2 + G_3) + \\ + (B_1 + B_2 + B_3). \tag{2.228}$$

В § 2.10 указывалось, что если равностимульный цвет помещается в центроиде цветового треугольника, то цвет $Ц$ помещается в центре тяжести трех масс m_1, m_2, m_3, находящихся в его вершинах и равных количествам основных цветов, необходимым для согласования с цветом $Ц$.

Будем считать, что массы m_1, m_2, m_3 равны модулям цветов $Ц_1$, $Ц_2$, $Ц_3$:

$$m_1 = R_1 + G_1 + B_1; \quad m_2 = R_2 + G_2 + B_2; \quad m_3 = R_3 + G_3 + B_3. \tag{2.229}$$

Аналогично сказанному, можно считать, что цвет $Ц$ смеси цветов $Ц_1$, $Ц_2$, $Ц_3$, взятых в количествах m_1, m_2, m_3, помещается в центре тяжести трех масс m_1, m_2, m_3, находящихся в точках $Ц_1$, $Ц_2$, $Ц_3$. Построив



Рнс. 2.29. К определению положения цвета смесн $Ц$ цветов $Ц_1$ и $Ц_2$

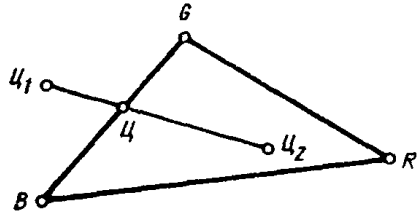
треугольннк с вершинамн в точках $Ц_1$, $Ц_2$, $Ц_3$ и нспользовав (2.216), заменнв в нем m на $m_Ц$, R на m_1, G на m_2, B на m_3, найдем положение точкн $Ц$.

Для смесн двух цветов $Ц_1$ н $Ц_2$ (рнс. 2.29) нмеем $m_Ц = m_1 + m_2$; $m_1 = R_1 + G_1 + B_1$; $m_2 = R_2 + G_2 + B_2$. Из (2.216) получаем $m_Ц\, h_1 = m_1 H_1$; $m_Ц\, h_2 = m_2 H_2$, но для двух цветов $H_1 = H_2$ и соответствует отрезку $Ц_1Ц_2$. Следовательно,

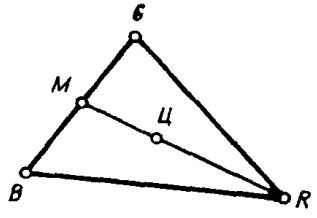
$$h_1/h_2 = m_1/m_2. \qquad (2.230)$$

Выраженне (2.230) позволяет найти положение точки $Ц$ в цветовом треугольннке, если нзвестны координаты смешнваемых цветов н равностимульный цвет помещается в центронде треугольннка основных цветов. Такнм образом, *цвет смеси двух цветов лежит в цветовом треугольнике на прямой, соединяющей их, и разделяет эту прямую на отрезки, длина которых обратно пропорциональна модулям смешиваемых цветов*. Из этого правнла следует, что если цвет $Ц_1$ находнтся вне цветового треугольннка, как показано на рнс. 2.30, то, добавляя к нему цвет $Ц_2$, можно получнть цвет $Ц$, лежащнй на стороне илн внутри треугольннка, т. е. имеющий меньшую насыщенность, чем цвет $Ц_1$. Смесь цветов R и G лежнт на стороне треугольннка RG, смесь цветов R н B — на стороне RB, смесь цветов B и G — на стороне BG.

Если складываются три цвета $Ц_1$, $Ц_2$, $Ц_3$, то вначале надо найтн по (2.229) цвет $Ц'$ смесн двух цветов, например $Ц_1$ н $Ц_2$, а затем такнм же способом найтн цвета смесн $Ц'$ н оставшегося третьего цвета $Ц_3$. Исходя нз (2.230) можно найтн в цветовом треугольннке, в котором равностнмульный цвет и центронд помещаются в одной н той же точке, отношенне отрезков на некоторых прямых, как показано на рнс. 2.31. Напрнмер, если цвет $Ц$ задан еднннчным уравненнем $(Ц) = r\,(R) + g\,(G) + b\,(B)$, аналогичным (2.24), то его можно рассматрнвать как



Рнс. 2.30. К объясненню способа умеиьшення насыщенностн цвета $Ц_1$ путем смесн его с цветов $Ц_2$



Рнс. 2.31. К определению отношення отрезков

смесь цветов R и M, лежащих на прямой, проходящей через точку $Ц$. Здесь модули цветов R, G, B в трихроматических единицах T равны r, g, b соответственно. Цвет M — цвет смеси цветов G и B, модуль его равен $g + b$ единиц T. Следовательно, из (2.230) можно написать два отношения отрезков:

$$GM/MB = b/g; \quad MЦ/ЦR = r/(g+b). \tag{2.231}$$

Отношение аналогичных отрезков для прямых, проходящих через точку $Ц$ и вершины B и G, можно получить независимо от формы треугольника.

2.12. СТАНДАРТНАЯ ТРИХРОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОСНОВНЫХ ЦВЕТОВ RGB МКО — 1931 г.

В 1860 г. Д. К. Максвелл построил цветовой треугольник, выбрав в качестве основных цветов красный R, зеленый G и синий B спектральные цвета с длинами волн 630, 528, 457 нм соответственно и написал цветовое уравнение

$$Ц = m(Ц) = R(R) + G(G) + B(B). \tag{2.232}$$

Максвелл измерил количество цветов R, G, B, необходимые для согласования цвета их смеси со всеми спектральными цветами, в единицах яркости и получил показанные на рис. 2.32* зависимости от длины волны спектрального цвета величин R, G, B (*кривые смешения*). Как видно из рисунка, при выбранных основных цветах один из них всегда берется с отрицательным знаком, т. е. добавляется не к смеси двух остальных, а к согласуемому спектральному цвету для понижения его насыщенности. Определив по значениям R, G, B координаты цветности r, g, b для всех спектральных цветов по формулам, аналогичным (2.23), Максвелл изобразил на равностороннем треугольнике RGB методом трилинейных координат точки, соответствующие спектральным цветам. Соединяющая их плавная линия называется *спектральным локусом*. На рис. 2.33* показан равносторонний цветовой треугольник Максвелла и спектральный локус (штриховая и сплошная линии). Этот треугольник аналогичен треугольникам рис. 2.26, 2.27. Вершина G имеет координаты $r = 1/2$; $g = \sqrt{3}/2$. Благодаря наличию отрицательных ординат (ветвей) у кривых смешения (см. рис. 2.32) спектральный локус выходит за пределы треугольника RGB. При выбранных Максвеллом единицах количеств основных цветов точка белого цвета на рис. 2.33 не совпадает с центроидом треугольника RGB, для которого $r = 0{,}5$; $g = 1/(2\sqrt{3})$ (точка пересечения медиан).

В ходе дальнейшего развития учения о цвете были получены уточненные кривые смешения, соответствующие следующим условиям: площади под кривыми смешения (т. е. кривыми, представляющими зависимости координат цвета R, G, B от длины волны спектральных цветов) одинаковы; поле зрения 2°, сумма яркостей основных цветов

в относительных единицах равна стандартной относительной видности (относительной спектральной световой эффективности) v_λ; в качестве основных цветов взяты спектральные цвета R, G, B с длинами волн соответственно 700; 546,1; 435,8 нм. Полученные данные были усреднены, и средние значения координат цветности r, g, b для спектральных цветов были стандартизованы на восьмой сессии МКО в 1931 г.

По аналогии с (2.24) в стандартной системе RGB МКО — 1931г. единичное уравнение

$$(И) \quad r(R) + g(G) + b(B),$$

в котором сохраняется (2.25):

$$r + g + b = 1. \tag{2.233}$$

В табл. 2.3 даны значения координат цветности r, g, b и удельных координат $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$ для спектральных цветов стандартной системы RGB МКО — 1931 г. (длины волн λ даны через интервал 10 нм, в литературе приводятся также данные для интервала 5 нм). В качестве единичных количеств основных цветов, обозначаемых (R), (G), (B), выбраны такие их количества, смесь которых согласуется с равностимульным цветом, в качестве равностимульного взят *равноэнергетический белый цвет* E, т. е. такой белый цвет, у которого все спектральные составляющие имеют одинаковую лучистую энергию (мощность излучения). Для такого цвета (2.232) имеет вид

$$E - m(E) \quad 1(R) + 1(G) + 1(B), \tag{2.234}$$

т. е. $R \quad G = B \quad 1\ T$; $m_E \quad 3\ T$. Следовательно, координаты его цветности

$$r - g = b = 1/3 = 0{,}33333. \tag{2.235}$$

Измерения показывают, что световые потоки единичных количеств основных цветов, светоВт, соотносятся как

$$\Phi_{V(R)} : \Phi_{V(G)} : \Phi_{V(B)} - 1 : 4{,}5907 : 0{,}0601. \tag{2.236}$$

За единичные количества основных цветов R, G, B можно принять их количества, создаваемые световыми потоками $F_{(R)}$; $F_{(G)}$ и $F_{(B)}$, равными 1; 4,5907 и 0,0601 светоВт соответственно. Аналогично этому можно принять условно, что яркости единичных количеств этих основных цветов $L_{(R)}$, $L_{(G)}$ и $L_{(B)}$ равны соответственно 1; 4,5907 и 0,0601 кд/м^2. Тогда для равностимульного белого цвета E, получаемого смесью этих количеств основных цветов, яркость $L_0 - L_{(R)} + L_{(G)} + L_{(B)} - 1 + 4{,}5907 + 0{,}0601 - 5{,}6508$ кд/м^2. Относительные яркостные коэффициенты для белого цвета E равны в соответствии с (2.29): $L''_{(R)} - 1/5{,}6508 \quad 0{,}177$; $L''_{(G)} - 4{,}5907/5{,}6508 \quad 0{,}813$; $L''_{(B)} \quad 0{,}0601/5{,}6508 \quad 0{,}00107$. В соответствии с (2.10) можно считать, что при согласовании с белым цветом E относительные яркости основных цветов:

$$L'_{(R)} = 1; \quad L'_{(G)} = 4{,}5907; \quad L'_{(B)} - 0{,}0601. \tag{2.237}$$

Таблица 23

Координаты цветности			$\lambda_{нм}$	Удельные координаты цвета		
r	g	b		$\bar{r}$	$\bar{g}$	$\bar{b}$
0,0272	—0,0115	0,9843	380	0,00003	—0,00001	0,00117
0,0263	—0,0114	0,9851	390	0,00010	—0,00004	0,00359
0,0247	—0,0112	0,9865	400	0,00030	—0,00014	0,01214
0,0225	—0,0109	0,9884	410	0,00084	—0,00041	0,03707
0,0181	—0,0094	0,9913	420	0,00211	—0,00110	0,11541
0,0088	—0,0048	0,9960	430	0,00218	—0,00119	0,24769
0,0084	—0,0048	1,0036	440	—0,00261	0,00149	0,31228
0,0390	0,0218	1,0172	450	—0,01213	0,00678	0,31670
0,0909	0,0517	1,0392	460	—0,02608	0,01485	0,29821
—0,1821	0,1175	1,0646	470	—0,03933	0,02538	0,22991
—0,3667	0,2906	1,0761	480	—0,04939	0,03914	0,14494
—0,7150	0,6996	1,0154	490	—0,05814	0,05689	0,08257
—1,1685	1,3905	0,7780	500	—0,07173	0,08536	0,04776
—1,3371	1,9318	0,4053	510	—0,08901	0,12860	0,02698
—0,9830	1,8534	0,1296	520	—0,09264	0,17468	0,01221
—0,5159	1,4761	0,0398	530	—0,07101	0,20317	0,00549
0,1707	1,1628	0,0079	540	—0,03152	0,21466	0,00146
0,0974	0,9051	—0,0045	550	0,02279	0,21178	—0,00058
0,3164	0,6881	—0,0045	560	0,09060	0,19702	—0,00130
0,4973	0,5067	—0,0040	570	0,16768	0,17087	—0,00135
0,6449	0,3579	—0,0028	580	0,24526	0,13610	—0,00108
0,7617	0,2402	—0,0019	590	0,30928	0,09754	—0,00079
0,8475	0,1537	—0,0012	600	0,34429	0,06246	—0,00049
0,9059	0,0949	—0,0008	610	0,33971	0,03557	—0,00030
0,9425	0,0580	0,0005	620	0,29708	0,01828	0,00015
0,9649	0,0354	0,0003	630	0,22677	0,00833	—0,00008
0,9797	0,0205	—0,0002	640	0,15968	0,00334	—0,00003
0,9888	0,0113	—0,0001	650	0,10167	0,00116	—0,00001
0,9940	0,0061	0,0001	660	0,05932	0,00037	0,00000
0,9966	0,0035	0,0001	670	0,03149	0,00011	0,00000
0,9984	0,0016	0,0000	680	0,01687	0,00003	0,00000
0,9996	0,0004	0,0000	690	0,00819	0,00000	0,00000
1,0000	0,0000	0,0000	700	0,00410	0,00000	0,00000
1,0000	0,0000	0,0000	710	0,00210	0,00000	0,00000
1,0000	0,0000	0,0000	720	0,00105	0,00000	0,00000
1,0000	0,0000	0,0000	730	0,00052	0,00000	0,00000
1,0000	0,0000	0,0000	740	0,00025	0,00000	0,00000
1,0000	0,0000	0,0000	750	0,00012	0,00000	0,00000
1,0000	0,0000	0,0000	760	0,00006	0,00000	0,00000
1,0000	0,0000	0,0000	770	0,00003	0,00000	0,00000
1,0000	0,0000	0,0000	780	0,00000	0,00000	0,00000
Алгебраическая сумма				1,89088	1,89107	1,88942

Тогда координаты любого цвета $Ц$ можно определять по (2.13), если известны яркости L_R, L_G, L_B основных цветов R, G, B, при которых этот цвет $Ц$ согласуется их смесью:

$$R = L_R/L'_{(R)} = L_R;\quad G = L_G/L'_{(G)} = L_G/4{,}5907;$$
$$B = L_B/L'_{(B)} = L_B/0{,}0601. \qquad (2.238)$$

Основу колориметрии составляют следующие данные, полученные экспериментально: стандартная относительная видность v_λ (см. табл. 1.2); координаты цветности r, g, b (см. табл. 2.3); относительные яркости единичных количеств основных цветов $L'_{(R)}$, $L'_{(G)}$, $L'_{(B)}$ (см. (2.237)). Чтобы определить, каковы мощности 1 светоВт цвета R, 4,5907 светоВт цвета G и 0,0601 светоВт цвета B, необходимо согласно (1.7) разделить эти количества цветов на значения стандартной относительной видности v_λ на длинах волн 700, 546,1, 435,8 нм соответственно (т. е. на числа 0,0041; 0,9756; 0,0173, взятые из табл. 1.2). Это дает для основных цветов:

$$\begin{aligned} &1 \text{ светоВт } R = 243{,}9 \text{ Вт}; \quad 4{,}5907 \text{ светоВт } G = 4{,}663 \text{ Вт}; \\ &0{,}0601 \text{ светоВт } B = 3{,}384 \text{ Вт}. \end{aligned} \tag{2.239}$$

На рис. 2.34*, *а* показан спектральный локус на равностороннем цветовом треугольнике стандартной системы RGB, аналогичном рис. 2.26, в качестве единичных количеств основных цветов выбраны их количества в световаттах из (2.239). Особенностью этого спектрального локуса (рис. 2.34*, *а*) является хорошее совпадение части его контура со стороной треугольника RG, выпуклая форма, неравномерность распределения длин волн по его периметру (сгущение в начале и конце).

Равноэнергетический белый цвет E изображается на рис. 2.34, *а* точкой, лежащей на медиане, проведенной из вершины B треугольника основных цветов, на расстоянии от этой вершины, равном 2/3 длины медианы, т. е. координаты цветности точки E равны $r = g = b = 1/3$. На рис. 2.34*, *б* показан спектральный локус, когда в качестве единичных количеств цветов (R), (G), (B) выбраны, в отличие от стандарта МКО их количества, равные 1 светоВт. Так как количества основных цветов в световаттах, заданные левыми частями равенств (2.239), дают согласование с белым цветом E, то можно считать, что для рис. 2.34*, *б* координаты цвета E равны: $R = 1$; $G = 4{,}5907$; $B = 0{,}0601$, его модуль $m = 1 + 4{,}5907 + 0{,}0601 = 5{,}6508$, и координаты цветности $r = 1/5{,}6508 = 0{,}177$; $g = 4{,}5907/5{,}6508 = 0{,}813$; $b = 0{,}0601/5{,}6508 = 0{,}00107$. Точка E здесь оказывается прижатой к стороне RG цветового треугольника, поэтому красным, оранжевым, желтым и зеленым цветам разной насыщенности в нем представляется недостаточная площадь; почти вся его площадь занята фиолетовыми, синими и пурпурными цветами разной насыщенности.

Количества основных цветов R, G, B в ваттах, заданные правыми частями (2.239), дают согласование с белым цветом E, поэтому можно считать, что в отличие от стандарта координаты цвета E равны: $R = 243{,}9$; $G = 4{,}663$; $B = 3{,}384$, его модуль $m = 243{,}9 + 4{,}663 + 3{,}384 = 251{,}947$ и координаты его цветности: $r = 243{,}0/251{,}947 = 0{,}968$; $g = 4{,}663/251{,}947 = 0{,}00185$; $b = 3{,}384/251{,}947 = 0{,}00134$. В данном случае точка E оказывается прижатой к вершине R цветового треугольника и для представления красных цветов разной насыщенности в нем нет места

Если спектральный цвет имеет мощность излучения 1 Вт, то его координаты цвета R, G, B в (2.232) называются *удельными координатами* $\bar{r}$, $\bar{g}$, $\bar{b}$ в соответствии с (2.32) Координаты цвета любого цвета в этом случае можно найти из выражений, аналогичных (2.44) и (2.45):

$$R=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\bar{r}P_\lambda\,\bar{d}\lambda\approx\Delta\lambda\Sigma\bar{r}P_\lambda,\quad G=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\bar{g}P_\lambda\,\bar{d}\lambda\approx\Delta\lambda\Sigma\bar{g}P_\lambda,$$

$$B=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\bar{b}P_\lambda\,d\lambda\approx\Delta\lambda\Sigma\bar{b}P_\lambda. \qquad (2.240)$$

Стандартные удельные координаты $\bar{r}$, $\bar{g}$, $\bar{b}$ для системы RGB МКО — 1931 г., приведенные в табл 2 3, были получены через r, g, b m_λ из формулы, аналогичной (2.40) При этом по аналогии с (2 39) имеем

$$\bar{m}_\lambda=v_\lambda/(r\Phi_{V(R)}+g\Phi_{V(G)}+b\Phi_{V(B)}). \qquad (2.241)$$

Вместо $\Phi_{V(R)}$, $\Phi_{V(G)}$, $\Phi_{V(B)}$ подставим в (2.241) соответственно 1; 4,5907 и 0,0601 светоВт из (2.236), получим

$$\bar{m}_\lambda=v_\lambda/(r+g4{,}5907+b0{,}0601). \qquad (2.242)$$

Пример. Для $\lambda=500$ нм имеем из табл. 1.2 $v_\lambda=0{,}323$, а из табл. 2.3 находим для этой волны $r=-1{,}1685$; $g=1{,}3905$; $b=0{,}7780$. Подставив эти значения в (2.242), получим $\bar{m}_\lambda$ 0,0613. Из формул, аналогичных (2.40):

$$\bar{r}=\bar{r}\,\bar{m}_\lambda;\quad \bar{g}=g\bar{m}_\lambda;\quad \bar{b}=b\bar{m}_\lambda, \qquad (2.243)$$

находим $\bar{r}$ — 0,07173; $\bar{g}$ — 0,08536; $\bar{b}$ = 0,04776, что соответствует данным табл. 2.3.

Вычисленные таким образом стандартные значения удельных координат $\bar{r}$, $\bar{g}$, $\bar{b}$ в системе RGB МКО — 1931 г приведены в табл. 2 3 на рис 2.35* Эти кривые (рис. 2.35*) обладают следующими свойствами:

1) площади под ними одинаковы Действительно, для белого цвета E имеем $P_\lambda=\text{const}$ и из (2.240) получим $R_E=P_\lambda\int\bar{r}d\lambda$; $G_E=P_\lambda\int\bar{g}d\lambda$; $B_E=P_\lambda\int\bar{b}d\lambda$ Из (2 234) для белого E имеем $R-G=B=1$Т, поэтому $\int\bar{r}d\lambda=\int\bar{g}d\lambda=\int\bar{b}d\lambda$, т. е. площади равны: 2) сумма световых потоков основных цветов, необходимых для согласования со спектральным цветом с длиной волны λ мощностью 1 Вт, равна стандартной относительной видности v_λ в соответствии с (2.41).

Из формулы (2.239) следует, что если спектральный цвет $\bar{Ц}_\lambda$ с мощностью 1 Вт согласуется трихроматическими количествами $\bar{r}$, $\bar{g}$, $\bar{b}$ основных цветов R, G, B и если при этом мощность единичного количества (R) основного цвета $P_{(R)}=243{,}9$ Вт, то мощности основных цветов, необходимые для согласования со спектральным цветом $\bar{Ц}_\lambda$ мощностью 1 Вт, равны. $\bar{P}_R=\bar{r}$ 243,9; $\bar{P}_G=\bar{g}$ 4,663; $\bar{P}_B$ $\bar{b}$ 3,384 Вт

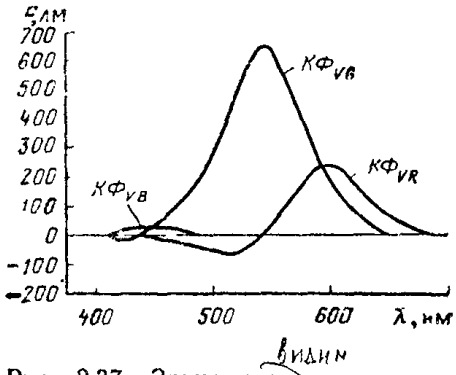


Рис. 2.37 Зависимость световых потоков основных цветов стандартной системы RGB от длины волны, необходимые для согласования спектральных цветов мощностью 1 Вт ($K = 683$ лм/светоВт)

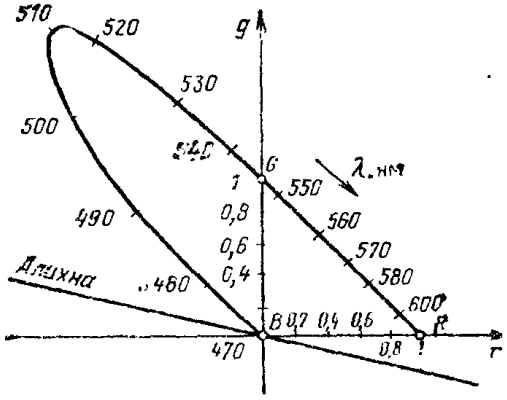


Рис. 2.38. Диаграмма цветностей r, g и положение алихны

На рис 2 36 показаны $\bar{P}_R$, $\bar{P}_G$, $\bar{P}_B$ в ваттах Как видно из рисунка, мощность излучения красного основного цвета R, необходимая для согласования со спектральными цветами, во много раз больше мощности излучения синего и зеленого основных цветов. Если умножить числовые значения кривых $\bar{P}_R$, $\bar{P}_G$, $\bar{P}_B$ на стандартную относительную видность v_λ, то согласно (2.42) получим численные значения световых потоков Φ_{VR}, Φ_{VG}, Φ_{VB}, светоВт. Кривые рис. 2 37 представляют произведения значений этих световых потоков, помноженных на K где $K = 683$ лм/светоВт. Из (1 10) и рис 2 37 видно, что необходимый для согласования со спектральными цветами мощностью 1 Вт световой поток зеленого основного цвета значительно больше, чем световые потоки красного и синего основных цветов.

На рис. 2 38 показан спектральный локус и алихна в прямоугольной системе координат g, r, аналогичной рис 2.28. Цвета отдельных участков на этом локусе определяются в соответствии с данными, приведенными в гл. 1 (см. табл. 1 1). На рис. 2.38 показана параллельная проекция единичной плоскости на соответствующим образом выбранную координатную плоскость, в которой оси g и r взаимно перпендикулярны, одинаковые координаты g и r изображаются равными отрезками, так что шкалы значений g и r равномерны

Координату цветности b можно найти из (2.233), где координаты цветности равны для точек, представляющих основные цвета R, G, B соответственно: $r = 1$, $g = 0$, $b = 0$; $g = 1$, $r = 0$, $b = 0$; $b = 1$, $r = 0$, $g = 0$. Точка B находится в начале координат. Для точек, лежащих на стороне RG цветового треугольника, справедливо $b = 0$ и $r + g = 1$. На этой стороне находятся насыщенные красный, оранжевый, желтый, зеленый цвета. На стороне RB находятся насыщенные

пурпурные цвета. Спектральный локус здесь выходит за пределы треугольника основных цветов *RGB*, так как одна из координат цветности *r*, *g*, *b* (см табл 2.3) всегда отрицательна. Следовательно, все цвета, лежащие внутри треугольника *RGB*, менее насыщены, чем спектральные. Равноэнергетический белый цвет *E* (равностимульный) изображается точкой, лежащей в центроиде треугольника *RGB* ($r = 0{,}333$; $g = 0{,}333$). На рис. 2.38 дана проекция алихны на плоскость *rg*.

По аналогии с (2.28) можно написать выражение для яркости единичного количества спектрального цвета $Ц_\lambda$ в системе RGB МКО — 1931 г.:

$$L_{(Ц)} = rL_{(R)} + gL_{(G)} + bL_{(B)}. \qquad (2.244)$$

Подставив в (2.244) $L_{(R)} = 1$; $L_{(G)}$ 4,5907; $L_{(B)}$ 0,0601 из (2.236), получим для $L_{(Ц)}$ в тех же единицах, что и для $L_{(R)}$, $L_{(G)}$, $L_{(B)}$:

$$L_{(Ц)} = r + 4{,}5907g + 0{,}0601b. \qquad (2.245)$$

Подставив в (2.245) $b = 1 - (r + g)$, получим $L_{(Ц)}$ r $4{,}5907g + 0{,}0601 [1 - (r + g)]$, т. е.

$$L_{(Ц)} \quad 0{,}9399r + 4{,}5306g + 0{,}0601. \qquad (2.246)$$

Условие $L_{(Ц)} = 0$ даст уравнение алихны

$$0{,}9399r + 4{,}5306g + 0{,}0601 = 0 \text{ или } g = -0{,}208r - 0{,}013. \qquad (2.247)$$

Отсюда следует, что алихна проходит вблизи от начала координат под углом 168° 20′ к оси 0*r*. На рис. 2 39 на диаграмме цветностей построены линии $b = A$, где $A = \text{const}$. Эти линии определяются уравнением, полученным из (2.233):

$$g = 1 - r - A. \qquad (2.248)$$

Рассмотрим построение на прямоугольной диаграмме цветностей *r*, *g* линий постоянных значений отношения координат цветности.

Уравнение прямой линии *OA*, приведенной на диаграмме цветностей (рис. 2.40) имеет вид $g = p_1 r$, где p_1 — постоянный коэффициент Таким образом, на прямой *OA* имеем $g/r = p_1$. Если p_1 — переменный параметр, то это уравнение справедливо для всех прямых пучка, исходящего из точки *O*, причем каждой из них соответствует свое значение p_1. Прямую CA_1, проходящую через точку $r = 1$ на оси *r*, задают уравнением $g = -p_2 r + p_2$, или $g = p_2 (1 - r)$. Подставив в него r $1 - g - b$, получим $g = p_2 (g + b)$ или $g (1 - p_2) = p_2 b$, откуда g/b $p_2/(1 - p_2)$. Это уравнение справедливо для пучка прямых, исходящих из точки $r = 1$ на оси *r* (т. е. из точки *C*), и каждой прямой соответствует значение, p_2. Прямую DA_2, проходящую через точку $g = 1$ на оси *g*, задают уравнением $r = -p_3 g + p_3 = p_3 (1 - g)$. Подставив в него $1 - g = r + b$, получим $r = p_3 (r + b)$ или $r (1 - p_3) = p_3 b$, откуда $r/b = p_3/(1 - p_3)$. Это уравнение справедливо для пучка прямых, исходящего из точки $g = 1$ на оси *g*, и каждой прямой

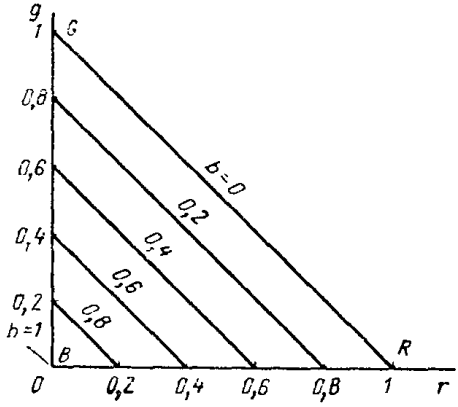


Рис. 2.39. Линии постоянных значений цветности b на диаграмме цветностей r, g

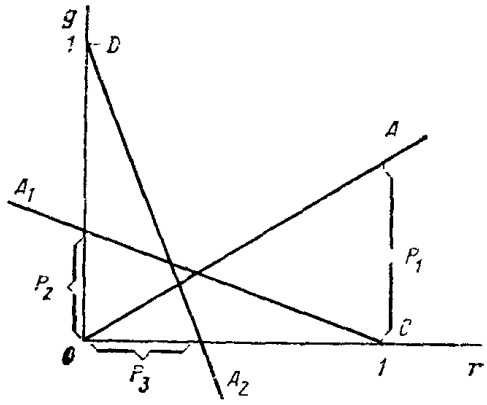


Рис. 2.40. Линии постоянных отношений координат цветности на диаграмме цветностей r, g

соответствует свое значение p_3. Формулы для расчетов в стандартной системе RGB МКО — 1931 г. приведены в § 2 4.

Система RGB МКО — 1931 г. имеет следующие недостатки: 1) отрицательные значения координат цветности r, g, b и удельных координат $\bar{r}$, $\bar{g}$, $\bar{b}$ затрудняют расчеты для сложных излучений, когда приходится пользоваться (2.240);

2) если цвет задан яркостью (или световым потоком) и координатами цветности r, g, b, то для вычисления $L_{(u)}$ по (2.246), модуля m по (2.28) и координат цвета R, G, B по (2.23) приходится делать трудоемкие вычисления, так как r, g, b имеют разные знаки. Для непосредственного вычисления координат цвета R, G, B можно также пользоваться (2 59) ... (2.61);

3) кривые координат цветности r, g, b признаны на сессии МКО в 1955 г. недостаточно точными, особенно в области синих цветов.

2.13. СТАНДАРТНАЯ ТРИХРОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОСНОВНЫХ ЦВЕТОВ XYZ МКО — 1931 г.

Стандартная трихроматическая система основных цветов XYZ как и система RGB была принята восьмой сессией МКО в 1931 г. и является производной от системы RGB Основные цвета X, Y, Z этой системы показаны на рис 2.41 на диаграмме цветностей rg точками X, Y, Z, координаты цветности которых r, g, b даны в табл. 2 4, где (X), (Y), (Z) означают единичные количества цветов X, Y, Z в системе RGB.

Цвета X, Y, Z не являются реальными, а представляют собой математическую абстракцию (точки на диаграмме цветностей системы RGB МКО — 1931 г), удобную для расчетов, т е это цвета теоретические Так как спектральный локус находится внутри треугольника XYZ,

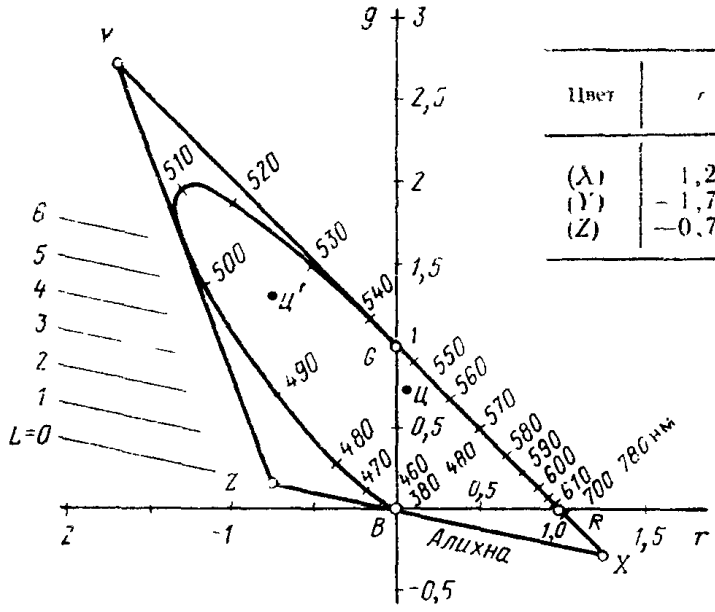


Рис 2.41. Спектральный локус в стандартной системе RGB МКО — 1931 г.

Таблица 2.1

Цвет	r	g	b
(X)	1,2750	—0,2778	0,0028
(Y)	—1,7393	2,7673	—0,0280
(Z)	—0,7431	0,1409	1,6022

то любой спектральный цвет может быть согласован смесью положительных количеств основных цветов X, Y, Z. Поэтому система XYZ не имеет недостатков, свойственных стандартной системе RGB МКО — 1931 г. Значения координат цветности x, y, z для спектральных цветов в стандартной системе XYZ МКО — 1931 г. даны в табл 2 5 с интервалом 10 нм для λ (в литературе приводятся таблицы для интервала 5 нм). В этой же таблице даны значения удельных координат $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ для спектральных цветов Кривые $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$, показанные на рис 2.42, являются кривыми сложения Удельные координаты рассчитаны по (2 184) и (2 208) по известным значениям $\bar{r}$, $\bar{g}$, $\bar{b}$ и r, g, b.

Значения всех названных величин x, y, z и $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ положительны. Основная ветвь кривой $\bar{x}$ имеет максимум на длине волны 600 нм,очень близкой к длине волны, на которой имеет максимум кривая $\bar{r}$ (605 нм) Максимум малой ветви кривой $\bar{x}$ на длине волны 440 нм, очень близкой к длине волны, на которой имеются максимумы кривой $\bar{z}$ (445 нм) и кривой $\bar{b}$ (445 нм) Кривая $\bar{y}$, как и кривая v_λ, имеет максимум на волне 555 нм. Обозначим $[X]$, $[Y]$, $[Z]$, $[Ц]$ — единичные количества основных цветов X, Y, Z цвета $Ц$ (одна трихроматическая единица T), а X, Y, Z — координаты цвета $Ц$, m — его цветовой модуль, x, y, z — его координаты цветности в системе XYZ МКО — 1931 г Тогда по аналогии с (2.7), (2.18), (2 16), (2.23).. (2 25), (2 32), напишем

$$Ц = m[Ц] = X[X] + Y[Y] + Z[Z]; \qquad (2.249)$$

$$m = X + Y + Z; \qquad (2.250)$$

$$x = X/m; \quad y = Y/m; \quad z = Y/m; \qquad (2.251)$$

Таблица 2.5

Координаты цветности			λ, нм	Удельные координаты цвета		
x	y	z		$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$
0,1741	0,0050	0,8209	380	0,0014	0,0000	0,0065
0,1738	0,0049	0,8213	390	0,0042	0,0001	0,0201
0,1733	0,0048	0,8219	400	0,0143	0,0004	0,0679
0,1726	0,0018	0,8226	410	0,0435	0,0012	0,2074
0,1714	0,0051	0,8235	420	0,1344	0,0040	0,6456
0,1689	0,0069	0,8242	430	0,2839	0,0116	1,3856
0,1644	0,0109	0,8247	440	0,3483	0,0230	1,7471
0,1566	0,0177	0,8257	450	0,3362	0,0380	1,7721
0,1440	0,0297	0,8263	460	0,2908	0,0600	1,6692
0,1241	0,0578	0,8181	470	0,1954	0,0910	1,2876
0,0913	0,1327	0,7760	480	0,0956	0,1390	0,8130
0,0454	0,2950	0,6596	490	0,0320	0,2080	0,4652
0,0082	0,5384	0,4534	500	0,0049	0,3230	0,2720
0,0139	0,7502	0,2359	510	0,0093	0,5030	0,1582
0,0743	0,8338	0,0919	520	0,0633	0,7100	0,0782
0,1547	0,8059	0,0394	530	0,1655	0,8620	0,0422
0,2296	0,7543	0,0161	540	0,2904	0,9540	0,0203
0,3016	0,6923	0,0061	550	0,4334	0,9950	0,0087
0,3731	0,6245	0,0024	560	0,5945	0 9950	0,0039
0,4441	0,5547	0,0012	570	0,7621	0,9520	0,0021
0,5125	0,4866	0,0009	580	0,9163	0,8700	0,0017
0,5752	0,4242	0,0006	590	1,0263	0,7570	0,0011
0,6270	0,3725	0,0005	600	1,0622	0,6310	0,0008
0,6658	0,3340	0,0002	610	1,0026	0,5030	0,0003
0,6915	0,3083	0,0002	620	0,8544	0,3810	0,0002
0,7079	0,2920	0,0001	630	0,6424	0,2650	0,0000
0,7190	0,2809	0,0001	640	0,4479	0,1750	0,0000
0,7260	0,2740	0,0000	650	0,2835	0,1070	0,0000
0,7300	0,2700	0,0000	660	0,1649	0,0610	0,0000
0,7320	0,2680	0,0000	670	0,0874	0,0320	0,0000
0,7334	0,2666	0,0000	680	0,0468	0,0170	0,0000
0,7344	0,2656	0,0000	690	0,0227	0,0082	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	700	0,0114	0,0041	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	710	0,0058	0,0021	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	720	0,0029	0,0010	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	730	0,0014	0,0005	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	740	0,0007	0,0003	0,0000
0,7347	0,2653	0 0000	750	0,0003	0,0001	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	760	0,0002	0,0001	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	770	0,0001	0,0000	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	780	0,0000	0,0000	0,0000
	Сумма			10,6836	10,6857	10,6770

$|Ц|\quad x|X|+y|Y|+z|Z|;$ (2.252)

$x+u+z\quad 1,$ (2.253)

1 Вт $Ц_\lambda\quad \bar{x}|X|+\bar{y}|Y|+\bar{z}|Z|.$ (2.254)

Заметнм, что x, y, z (см. табл. 2.5) можно вычислнть по нзвестным значенням удельных координат $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$, подставнв нх вместо X, Y, Z в (2 251). Для определения координат X, Y, Z (выраженных в трнхроматнческнх еднннцах) цвета излучення, содержащего ряд спектральных составляющнх н имеющего распределенне мощности излучення по спектру P_λ, напишем по аналогни с (2.238)

$$X = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{x} P_\lambda \, d\lambda \approx \Delta\lambda \Sigma \bar{x} P_\lambda; \quad Y = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{y} P_\lambda \, d\lambda \approx \Delta\lambda \Sigma \bar{y} P_\lambda;$$

$$Z = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{z} P_\lambda \, d\lambda \approx \Delta\lambda \Sigma \bar{z} P_\lambda. \qquad (2.255)$$

При этом велнчнна $\bar{y}$ сделана равной стандартной относительной видности v_λ во всем спектре. Поэтому при P_λ, Вт/нм, координата Y цвета $Ц$ представляет собой световой поток, светоВт, в соответствии с (1.8):

$$Y = \Phi_V = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v_\lambda P_\lambda \, d\lambda. \qquad (2.256)$$

При определении единнчного колнчества основного цвета Y следует выбирать велнчину P_λ в (2.256) так, чтобы $[Y] = 1$ светоВт, т. е. световой поток, светоВт,

$$\Phi_{V[Y]} = [Y] = 1. \qquad (2.257)$$

За единицы значенний координат цвета X, Y, Z прнняты колнчества основных цветов, которые дают согласование с белым цветом E, создаваемым спектральной плотностью мощности P_λ, Вт/нм. Тогда при любом значеннн P_λ справедлнво

$$[X] = P_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{x} d\lambda = 1T, \quad [Y] \quad P_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{y} d\lambda \quad 1T, \quad [Z] = P_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{z} d\lambda = 1T, \qquad (2.258)$$

так как P_λ не завнсит от λ во всем внднмом спектре для белого цвета E. Здесь $1T$ — одна трнхроматнческая единнца цвета. Чтобы получнть $[X] = [Y] = [Z]$, интегралы в (2.258) делают равнымн между собой (т. е. площади под крнвымн $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ делают одннаковымн). Отсюда следует, что белый цвет E является равностнмульным в системе XYZ МКО — 1931 г.

Рассмотрнм свойства стандартной системы XYZ МКО — 1931 г. Стандартная трнхроматнческая система XYZ определення цвета обладает важнымн свойствамн, обусловленными соответствующнм выбором основных теоретнческнх цветов X, Y, Z:

1. Спектральный локус на днаграмме цветностей (см. рнс. 2.41) находится внутрн цветового треугольника XYZ. Поэтому координаты

цветности x, y, z и удельные координаты $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ положительны для всех спектральных цветов.

2. Сторона XY треугольника XYZ на участке 700 ... 540 нм лежит очень близко к спектральному локусу, координата цветности $z \approx 0$, что облегчает расчеты. Прямая RG, описываемая уравнением $g + r = 1$ (на этой прямой координата цветности $b = 0$), близка к спектральному локусу (см. рис. 2.41), а стороны RG и XY цветовых треугольников RGB и XYZ приблизительно параллельны, так как треугольник XYZ получен линейным преобразованием треугольника RGB, при котором параллельность прямых сохраняется (см. приложение 1 и § 2.7).

3. Основные цвета X и Z лежат на алихе и поэтому не имеют светового потока Φ_V, т. е. они имеют цветности, но их яркость $L = 0$. Следовательно,

$$\Phi_{V[X]} = \Phi_{V[Z]} = 0; \quad L_{[X]} = L_{[Z]} = 0, \tag{2.259}$$

поэтому из (2.27) и (2.28) имеем, заменяя R, G, B на X, Y, Z, соответственно

$$L_{[Ц]} = YL_{[Y]}; \quad L_{[Ц]} = yL_{[Y]}, \tag{2.260}$$

где $L_{[Y]}$ — яркость, созданная световым потоком $\Phi_{V[Y]} = [Y] = 1$ светоВт.

Простота (2.260) по сравнению с (2.244) из-за справедливости (2.259), есть одно из преимуществ системы XYZ. Единичное количество любого цвета $[Ц]$ имеет в системе XYZ световой поток, светоВт,

$$\Phi_{V[Ц]} = Y_{[Ц]} = m_{[Ц]} y = y, \tag{2.261}$$

так как по определению единичного количества цвета $m_{[Ц]} = 1$ T. Таким образом, при согласовании с данным цветом $Ц$ основной цвет Y обладает всем световым потоком Φ_V, содержащимся в цвете $Ц$, равным в световаттах координате Y цвета $Ц$.

Очевидно, что при согласовании смеси основных цветов X, Y, Z с белым цветом E яркость единичного количества основного цвета Y равна сумме яркостей единичных количеств основных цветов R, G, B, необходимых для согласования, с этим цветом, т. е. равна $(1 + 4{,}5907 + 0{,}0601)\ L_{(R)} = 5{,}6508\ L_{(R)}$, где $L_{(R)}$ — яркость единичного количества основного цвета R.

В качестве равностимульного (эталонного) цвета $Ц_р$ выбран равноэнергетический белый цвет E. Поэтому исходя из (2.21) для единичного количества белого E

$$m_{[E]} = 1T; \quad X = Y = Z = (1/3)\,T, \tag{2.262}$$

$$x = y = z = 1/3 = 0{,}33333. \tag{2.263}$$

Следовательно, белый цвет E изображается точкой, лежащей на диаграмме цветностей в центроиде треугольника XYZ.

По аналогии с (2.41) можно написать $v_\lambda = \bar{x} L_{[X]} + \bar{y} L_{[Y]} + \bar{z} L_{[Z]}$. Подставив сюда (2.259), полагая $L_{[Y]} = 1$, получим

$$v_\lambda = \bar{y}, \tag{2.264}$$

так как $L_{[Y]}$ — яркость единичного количества основного цвета $[Y]$, соответствующая световому потоку $\Phi_{V[Y]} = 1$ светоВт. Таким образом, из (2.264) следует, что кривая $\bar{y}$ (см. рис. 2.42) является стандартной кривой относительной видности v_λ. Подставив (2.261) в (2.39) и (2.36), получим

$$\bar{m}_\lambda = v_\lambda / y; \quad \bar{x} = x v_\lambda / y; \quad \bar{z} = z v_\lambda / y. \tag{2.265}$$

4. Площади под кривыми $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ (рис. 2.42) равны между собой, как указывалось при получении (2.258).

5. Достаточная точность цветовых расчетов обеспечивается в системе XYZ при меньшей точности вычислений, чем в системе RGB МКО — 1931 г.

Треугольник XYZ (см. рис. 2.41) обладает следующими свойствами:

1. Линия XY может быть задана через координаты r и g как прямая, проходящая через точки спектрального локуса с волнами λ_1 и λ_2, равными соответственно 700 ($r_1 = 1{,}0000$; $g_1 = 0{,}0000$) и 640 нм ($r_2 = 0{,}9797$; $g_2 = 0{,}0205$), и описываемая уравнением $(r - r_2)/(r_1 - r_2) = (g - g_2)/(g_1 - g_2)$, откуда следует

$$r + 0{,}990g = 1. \tag{2.266}$$

Так как для выполнения (2.259) точки X и Z должны лежать на оси (см. рис. 2.41), то, решая совместно (2.247), и (2.266), получим значения координат цветности r, g, b точки X, приведенные в табл. 2.4.

2. Положение стороны YZ выбирают так, чтобы она была касательной к спектральному локусу в точке $\lambda = 505$ нм. Уравнение этой касательной

$$1{,}45r + 0{,}55g = 1. \tag{2.267}$$

Решая (2.267) совместно с (2.247), получим значения координат цветности g, b точки Z, приведенные в табл. 2.4. Следует отметить, что точка касания прямой YZ и кривой спектрального локуса определяет положение (505 нм) минимума кривой $\bar{x}$ (см. рис. 2.242). Решая совместно (2.266) и (2.267), получим значения координат цветности r, g, b

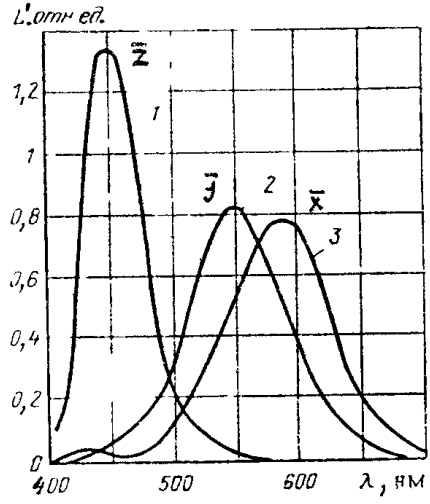


Рис. 2.42. Кривые удельных координат $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$:
1 — $\bar{z}$, 2 — $\bar{y}$; 3 — $\bar{x}$

точки Y, приведенные в табл. 2.4. Через точку R (см. рис. 2.41) проведена прямая, параллельная алихне. Если считать, что относительная яркость единичного количества цвета (R) в системе RGB равна единице, то точки на этой прямой имеют яркость, равную 1. Начертив равномерную сетку линий, параллельных алихне, получим линии постоянной яркости $L = 0...6$ (см. рис. 2.41).

3. Для перехода из системы RGB в систему XYZ МКО 1931 г. используют формулы, приведенные в § 2.8; 2.9. Можно сделать такой переход, определив матрицы $\tilde{\mathbf{F}}$, $\tilde{\mathbf{G}}$, $\tilde{\mathbf{L}}$, $\tilde{\mathbf{M}}$, $\tilde{\mathbf{S}}$, $\tilde{\mathbf{R}}$, обратные им, транспонированные и контрагредиентные и вывести формулы перехода для координат цвета [47, с. 88—96]

$$
\begin{aligned}
X &= 0{,}4900R + 0{,}31000G + 0{,}20000B,\\
Y &= 0{,}17700R + 0{,}81238G + 0{,}01063B,\\
Z &= 0{,}00002R + 0{,}01002G + 0{,}98996B,\\
R &= 2{,}36467X - 0{,}89658Y - 0{,}46809Z,\\
G &= -0{,}51523X + 1{,}42647Y + 0{,}08877Z,\\
B &= 0{,}00518X - 0{,}01442Y + 1{,}00925Z.
\end{aligned}
\tag{2.268}
$$

Эти выражения соответствуют матрицам линейного преобразования $\tilde{\mathbf{M}}_c$ и $\tilde{\mathbf{M}}_c^{-1}$ (2.162) и (2.166). В § 29 выведены формулы перехода для координат цветности (проективное преобразование)

$$
\begin{aligned}
x &= (0{,}49000r + 0{,}31000g + 0{,}20000b)/A,\\
y &= (0{,}17700r + 0{,}81238g + 0{,}01063b)/A,\\
z &= (0{,}00002r + 0{,}01002g + 0{,}98996b)/A,\\
A &= 0{,}66700r + 1{,}13239g + 1{,}20058b.
\end{aligned}
\tag{2.269}
$$

Для белого цвета E ($r = g = b = 0{,}33333$) по (2.269) получаем $x = y = z = 0{,}33333$, что и должно быть.

Обратная зависимость (см. 2.211)

$$
\begin{aligned}
r &= (2{,}36467x - 0{,}89658y - 0{,}46809z)/Q,\\
g &= (-0{,}51523x + 1{,}42647y + 0{,}08877z)\ Q,\\
b &= (0{,}00518x - 0{,}01442y + 1{,}00925z)/Q,\\
Q &= 1{,}85461x + 0{,}51548y + 0{,}62993z.
\end{aligned}
\tag{2.270}
$$

Для белого цвета E ($x = y = z = 0{,}33333$) получим $r = g = b = 0{,}33333$, что и должно быть.

По (2.269) вычисляют координаты цветности основных цветов R, G, B в системе XYZ. При этом цвета R и G имеют координаты $r = 1$, $g = b = 0$ и $r = b = 0$; $g = 1$ соответственно. Результаты этих вычислений сведены в табл. 2.6.

В 1964 г. на МКО введено понятие *дополнительного стандартного наблюдателя* ДСН МКО — 1964 г., так как были обнаружены неболь-

шие расхождения в определении координат цвета некоторых предметов по системе XYZ МКО — 1931 г. и по данным экспериментов с реальными наблюдателями. Д. Джадд вновь в 1951 г. измерил v_λ и внес поправки в коротковолновой части спектра на поле размером более 4°. По полученным результатам были получены новые удельные координаты $\bar{x}_{10}$, $\bar{y}_{10}$, $\bar{z}_{10}$. Измерения Н. Сперанской (СССР, 1959 г.) подтвердили данные Джадда. С учетом этих поправок координаты цветности обозначаются x_{10}, y_{10}, z_{10} [2].

2.14. ДИАГРАММА ЦВЕТНОСТЕЙ В СТАНДАРТНОЙ СИСТЕМЕ XYZ МКО — 1931 г.

Общие положения. На рис. 2.43 показаны стандартная диаграмма цветностей в прямоугольной системе координат xy, принятая МКО 1931 г. и треугольник основных цветов RGB, построенный по данным табл. 2.6. В результате линейного преобразования косоугольный треугольник XYZ (см. рис. 2.41) превратился в равнобедренный прямоугольный треугольник (см. рис. 2.43), а равнобедренный прямоугольный треугольник RGB (см. рис. 2.41) превратился в косоугольный (см. рис. 2.43), близкий к равностороннему. Положение точки белого цвета E изменилось по отношению к точкам R, G, B, X, Y, Z. По определению линейного преобразования рис. 2.43 представляет собой в цветовом пространстве параллельную проекцию плоскости, показанной на рис. 2.41, на плоскость, наклонную к ней. При этом точка $Ц$ на рис. 2.41 и 2.43 лежит в пределах треугольника RGB, точка $Ц'$ вне этого треугольника, что является свойством линейного преобразования. Сторона XY (см. рис. 2.43) описывается уравнением $x + y = 1$, так как на ней $z = 0$.

На диаграмме цветностей в системе XYZ (рис. 2.44*) построены спектральный локус и 10 секторов, приблизительно соответствующих отдельным цветностям, включая область белых цветов. Эти секторы построены в соответствии с данными табл. 1.1. На участке 700 ... 530 нм

Таблица 2.6

Цвет	x	y	z
[R]	0,73463	0,26534	0,00002
[G]	0,27375	0,71740	0,00885
[B]	0,16658	0,00885	0,82456

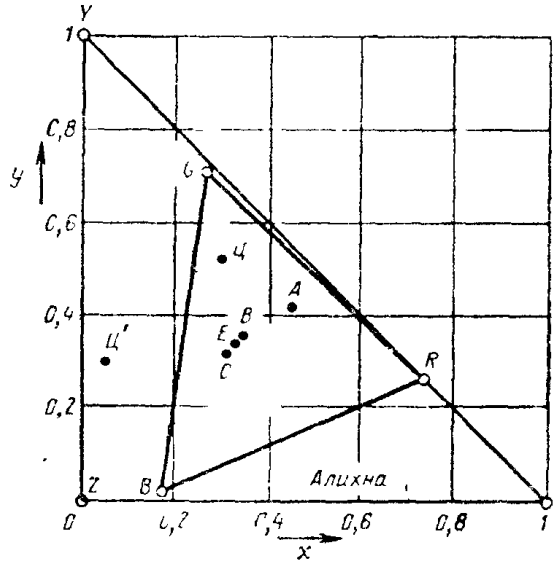


Рис. 2.43. Цветовые треугольники RGB и XYZ в системе XYZ МКО — 1931 г.

спектральный локус почти прямолннеен. Область зеленых н голубых спектральных цветов помещается на крнволннейном участке 560 ... ... 480 нм. Область снннх н фнолетовых спектральных цветов помещается на коротком крнволннейном участке 480 ... 380 нм. В областн 530 ... 550 нм крнвизна спектрального локуса наибольшая, поэтому насыщенные цвета получаются только при смесн двух блнзкнх по длнне волны спектральных цветов. Например, характернстика спектрального коэффнцнента отраженнн зеленой поверхностн должна быть узкой, чтобы ее насыщенность была высокой. Прн такой характеристнке общее колнчество отраженного света мало́, поэтому насыщенные зеленые н голубые цвета обычно нмеют малую яркость. Наоборот, яркость желтых, оранжевых н красных высоконасыщенных цветов относнтельно высока, так как спектральный локус в областн этнх цветов почти прямолннеен. Так как спектральный локус не нмеет вогнутых участков, то смесь двух спектральных цветов всегда лежнт нли на спектральном локусе нлн внутрн его, но никогда не может лежать вне площади локуса.

Пурпурные цвета с максимальной насыщенностью (в спектре солнца пурпурных цветов нет) помещаются на прямой, соединяющей концы спектрального локуса (т. е. точкн, соответствующие красному н синему цветам). Точкн, лежащне вне областн, огранченной спектральным локусом н лннней пурпурных цветов, следует рассматрнвать не как реальные цвета, а как точкн, отвечающне закону колорнметрнческого согласования (смешения) цветов н соответствующне теоретнческим цветам, более насыщенным, чем спектральные.

Цветовой тон и насыщенность цвета на диаграмме цветностей. Цветовой тон цвета $Ц$ на диаграмме цветностей может быть определен как цветовой тон спектрального цвета $Ц_\lambda$ с длнной волны λ_d, нзображаемого точкой $Ц_\lambda$ пересечения спектрального локуса с прямой, проходящей через точку белого цвета E и точку цвета $Ц$, как показано на рнс. 2.45. Насыщенность цвета $Ц$ определяется блнзостью точкн $Ц$ к спектральному локусу: с ее прнблнженнем к локусу насыщенность цвета $Ц$ возрастает. Еслн цвет $Ц$ получен путем смешения белого цвета E н спектрального цвета $Ц_\lambda$ соответственно в количестве m_1 и m_2 трнхоматнческнх едннниц, то на основанни (2.230) справедливо отношение отрезков:

$$EЦ : ЦЦ_\lambda = m_2 : m_1. \qquad (2.271)$$

Для цветов. лежащнх в пурпурной областн, например для цвета $Ц'$ (рнс. 2.45), цветовой тон определяют с помощью дополнительного спектрального цвета $Ц'_\lambda$ с длнной волны λ_c.

На днаграмме цветностей x, y можно построить лнннн постоянных значенй координаты цветностн z аналогнчно тому, как это сделано ранее (см. рнс. 2.39).

Преобладающая (*dominant*) длина волны цвета $Ц$. На днаграмме цветностей преобладающая длнна волны данного цвета λ_d определяется как длнна волны спектрального цвета $Ц_\lambda$, нзображаемого точкой пере-

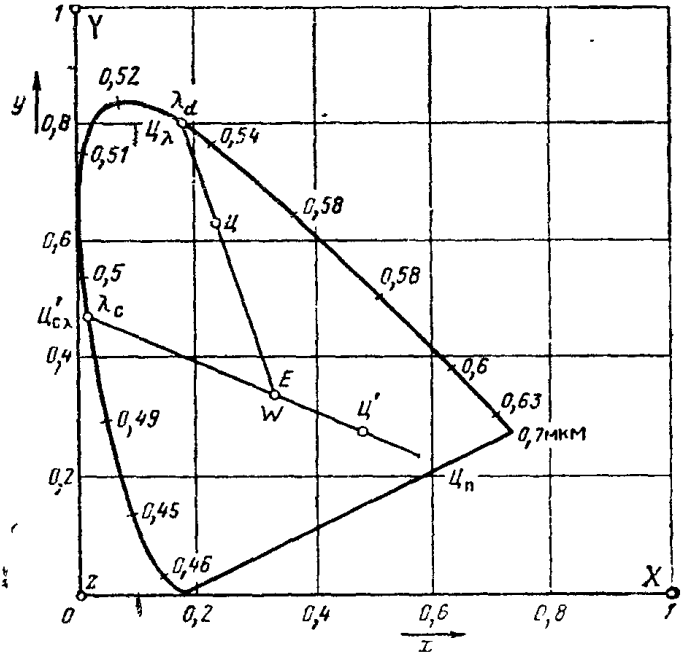


Рис. 2.45. Диаграмма цветностей x, y. Точки λ_d и λ_c характеризуют цветовые тона точек $Ц$ и $Ц'$

сечения спектрального локуса с прямой, проходящей через точку опорного белого цвета W и точку $Ц$. Для пурпурного цвета $Ц'$ вместо λ_d пользуются длиной волны λ_c цвета $Ц'_{c\lambda}$ дополнительного к цвету $Ц'$.

Чистота цвета. Для определения чистоты цвета $Ц$ с координатами цветности x, y в системе XYZ пользуются понятием *чистоты возбуждения* (или *условной чистоты*)

$$p_в = \frac{WЦ}{WЦ_\lambda} = \frac{(x-x_W)}{(x_\lambda - x_W)} = \frac{(y-y_W)}{(y_\lambda - y_W)}, \qquad (2.272)$$

где $WЦ$ и $WЦ_\lambda$ — отрезки на прямой $WЦ_\lambda$, проходящей через точки W и $Ц$.

На рис. 2.45 в качестве белого цвета W выбран стандартный равноэнергетический белый цвет E с координатами цветности x_W, y_W. В (2.272) x_λ, y_λ — координаты спектрального цвета $Ц_\lambda$ с длиной волны λ_d; x,y — координаты цветности цвета $Ц$. Таким образом, для белого W и спектрального $Ц_\lambda$ цветов значения чистоты возбуждения $p_в = 0$ и 1 соответственно. Для пурпурных цветов, например для цвета $Ц'$ (см. рис. 2.45), имеем

$$p_в = \frac{WЦ'}{WЦ_п} = \frac{x-x_W}{x_п - x_W} = \frac{y-y_W}{y_п - y_W}, \qquad (2.273)$$

где $WЦ'$ и $WЦ_п$ — отрезки на прямой, проходящей через точки W и $Ц'$ и пересекающей линию пурпурных цветов в точке $Ц_п$ с координатами $x_п$ и $y_п$.

В соответствии с (1.1) *колориметрическая чистота цвета* может быть определена относительно опорного белого цвета W:

$$p_к = F_\lambda/(F_\lambda + F_W) = (y - y_W)\,y - (x - x_W)\,v, \qquad (2.274)$$

где $f = (x - x_\lambda)\,(x_W - x_\lambda) = (y - y_\lambda)/(y_W - y_\lambda)$, (2.275)

x_λ и y_λ координаты цвета $Ц_\lambda$. Преобразовав (2.274), получим

$$p_к = (y_\lambda - y)(y - y_W)\,(y_\lambda - y_W) - (y_\lambda - y)(x - x_W)\,(x_\lambda - x_W). \qquad (2.276)$$

Сравнив (2.276) с (2.272), получим

$$p_к = (y_\lambda/y)\,p_в. \qquad (2.277)$$

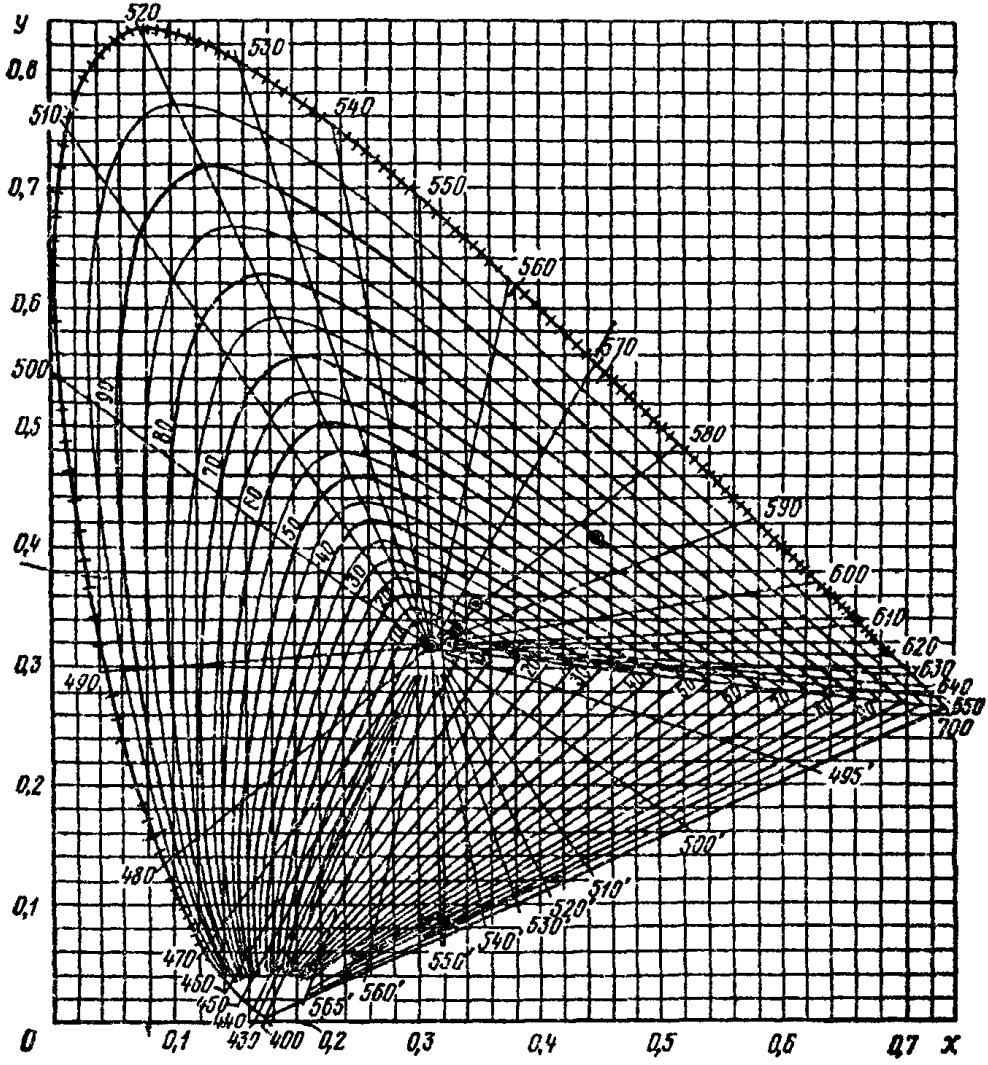


Рис 2.46. График для перехода от координат цветности x, y к координатам преобладающая длина волны λ_d и чистота цвета p_b, взятым относительно источника C (6500 К)

При определении λ_d, $p_в$ и $p_к$ в качестве опорного белого W можно брать стандартные белые цвета E, A, B, C, D_{65}, о которых будет сказано ниже. На рис. 2.46 показаны линии постоянных значений λ_d и $p_в$, нанесенные на диаграмму цветностей x, y при стандартном белом цвете C в качестве опорного цвета W (в литературе приводятся подобные графики при опорных белых цветах E,A,B). При расчете задавались значениями x_λ и $p_в$ и определяли соответствующие им x и y из (2.272) при известных x_W, и y_W. Отметим, что на диаграмме цветностей любая цветность (точка) может рассматриваться как смесь спектрального цвета с белым W.

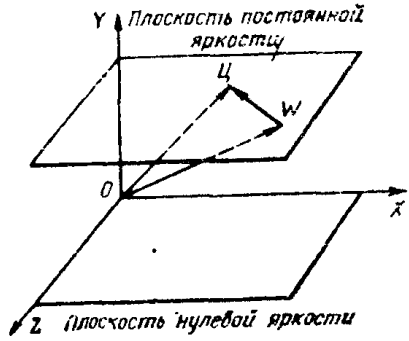


Рис. 2.47. Вектор цветоразности WЦ в плоскости постоянной яркости (здесь XOZ плоскость нулевой яркости

Понятие цветоразности. Под цветоразностью будем понимать колориметрическую разность между данным цветом $Ц$ и некоторым заданным (опорным) белым W с такой же яркостью, как и цвет $Ц$. Это понятие поясняется в пространственной системе координат на рис. 2.47, где цвета $Ц$ и W представлены векторами **ОЦ** и **OW**. Так как яркостью обладает только основной цвет Y (в системе XYZ), то плоскости, параллельные плоскости XOZ, являются плоскостями постоянной яркости. Поэтому яркости цветов $Ц$ и W, лежащих в плоскости, параллельной плоскости XOZ, одинаковы. Тогда вектор **WЦ** представляет собой цветоразность цвета $Ц$. С ростом яркости цветов $Ц$ и W плоскость, в которой лежат концы векторов **ОЦ** и **OW**, поднимаются вдоль оси OY и длина вектора цветоразности **WЦ** увеличивается.

При удалении конца вектора **ОЦ** от конца вектора **OW** в сторону увеличения насыщенности цвета $Ц$ длина вектора цветоразности **WЦ** также растет.

Смесь цветов $Ц_1$ и $Ц_2$ представляется на диаграмме цветностей точкой $Ц$, лежащей на прямой $Ц_1$ $Ц_2$. По аналогии с рис. 2.29 и в соответствии с (2.229) точка $Ц$ может быть определена из пропорции

$$Ц Ц_2 : Ц Ц_1 = m_1 : m_2, \qquad (2.278)$$

где m_1 и m_2 — цветовые модули цветов $Ц_1$ и $Ц_2$.

Модуль цвета $Ц$

$$m_Ц = m_1 + m_2. \qquad (2.279)$$

Если цвет $Ц$ — белый, то цвета $Ц_1$ и $Ц_2$ могут быть названы *взаимно дополнительными*.

2.15. ЦВЕТОВЫЕ РАСЧЕТЫ В СИСТЕМЕ XYZ МКО—1931 г.

Для определения координиат X, Y, Z цвета излучения, содержащего ряд спектральных составляющих с распределением мощности по спектру P_λ, пользуются (2.255), где она может быть выражена в абсолютных или относительных величинах. Если же цвет $Ц$ задан координатами цветности x, y и световым потоком $\Phi_{VЦ}$ в световаттах, то из (2.256) имеем $Y = \Phi_{VЦ}$, светоВт а из (2.250) и (2.251) получим

$$m = Y/y; \quad X = mx = Yx/y; \quad Z = mz = Yz/y. \tag{2.280}$$

Определим координаты цвета и цветности смеси цветов $Ц_1$, $Ц_2$, ..., $Ц_n$, если заданы их координаты цветности и их яркости. Пусть X_1, Y_1, Z_1, x_1, y_1, z_1, m_1 — координаты и модуль цвета $Ц_1$, аналогично X_2, Y_2, Z_2, x_2, y_2, z_2, m_2 — цвета $Ц_2$; X_n, Y_n, Z_n, x_n, y_n, z_n, m_n — цвета $Ц_n$. Пусть $X_Ц$, $Y_Ц$, $Z_Ц$, $x_Ц$, $y_Ц$, $z_Ц$, $m_Ц$ — координаты и модуль цвета $Ц$ смеси этих цветов. Тогда исходя из (2.226) и (2.228) можем написать

$$X_Ц = \sum_{k=1}^{n} X_k = m_1 x_1 + m_2 x_2 + \ldots + m_n x_n;$$

$$Y_Ц = \sum_{k=1}^{n} Y_k = m_1 y_1 + m_2 y_2 + \ldots + m_n y_n;$$

$$Z_Ц = \sum_{k=1}^{n} Z_k = m_1 z_1 + m_2 z_2 + \ldots + m_n z_n. \tag{2.281}$$

$$m_Ц = \sum_{k=1}^{n} m_k = m_1 + m_2 + \ldots + m_n. \tag{2.282}$$

Выразим модули m_1, m_2 ... m_n через яркости L_1, L_2, ..., L_n смешиваемых цветов. Если их световые потоки в световаттах Φ_{V1}, Φ_{V2}, ..., Φ_{Vn}, а $\Phi_{VЦ}$ — световой поток в световаттах цвета их смеси $Ц$, тогда из (2.256) имеем

$$\Phi_{V1} = Y_1; \quad \Phi_{V2} = Y_2; \ldots, \quad \Phi_{Vn} = Y_n; \quad \Phi_{VЦ} = Y_Ц. \tag{2.283}$$

Если яркости цветов пропорциональны их световым потокам, то

$$L_1 = k_1 Y_1; \quad L_2 = k_1 Y_2, \ldots; \quad L_n = k_1 Y_n; \quad L_Ц = k_1 Y_Ц, \tag{2.284}$$

где k_1 — постоянный коэффициент.

Из (2.284) с учетом (2.280) получим

$$m_1 = \frac{L_1}{k_1 y_1}; \quad m_2 = \frac{L_2}{k_1 y_2}; \ldots; \quad m_n = \frac{L_n}{k_1 y_n}; \quad m_Ц = \frac{L_Ц}{k_1 y_Ц}. \tag{2.285}$$

Подставив (2.285) в (2.281), получим

$$X_Ц = \frac{1}{k_1}\left(L_1 \frac{x_1}{y_1} + L_2 \frac{x_2}{y_2} + \ldots + L_n \frac{x_n}{y_n}\right); \quad Y_Ц = \frac{1}{k_1}(L_1 + L_2 + \ldots + L_n);$$

$$Z_Ц = \frac{1}{k_1}\left(L_1 \frac{z_1}{y_1} + L_2 \frac{z_2}{y_2} + \ldots + L_n \frac{z_n}{y_n}\right). \tag{2.286}$$

Подставив (2.285) в (2.282), получим

$$m_Ц = \frac{1}{k_1}\left(\frac{L_1}{y_1} + \frac{L_2}{y_2} + \ldots + \frac{L_n}{y_n}\right). \qquad (2.287)$$

Используя (2.286) и (2.287), получим

$$x_Ц = X_Ц/m_Ц; \quad y_Ц = Y_Ц/m_Ц; \quad z_Ц = Z_Ц/m_Ц, \qquad (2.288)$$

что и требовалось.

Если на диаграмме цветностей заданы четыре точки, представляющие цвета $Ц_1$, $Ц_2$, $Ц_3$, и цвет их смеси $Ц$, то можно найти координаты точки пересечения $Ц_п$ стороны $Ц_2\,Ц_3$ треугольника $Ц_1\,Ц_2\,Ц_3$ и прямой, проходящей через противоположную этой стороне вершину $Ц_1$ треугольника и точку $Ц$, как показано на рис. 2.48. Пусть x_1, y_1 — координаты цветности цвета $Ц_1$; x_2, y_2 — то же для цвета $Ц_2$; x_3, y_3 — то же для $Ц_3$; x, y — то же для цвета $Ц$; $x_п$, $y_п$ — то же для цвета $Ц_п$. Тогда имеем для любой точки $Ц$ с координатами x, y:

на прямой $Ц_1Ц$

$$(y-y_Ц)/(y_1-y_Ц) = (x-x_Ц)/(x_1-x_Ц), \qquad (2.289)$$

на прямой $Ц_2\,Ц_3$

$$(y-y_3)/(y_2-y_3) = (x-x_3)/(x_2-x_3). \qquad (2.290)$$

Решая (2.289) и (2.290), найдем x, y, т. е. координаты $x_п$, $y_п$ точки $Ц_п$ пересечения прямых $Ц_1\,Ц$ и $Ц_2\,Ц_3$. Это дает

$$x = x_п = (-bM_1 + cM_2)/(cd-ab),$$
$$y = y_п = (-dM_1 + aM_2)/(cd-ab). \qquad (2.291)$$
$$a = y_2 - y_3; \quad b = x_1 - x_Ц; \quad c = x_2 - x_3; \quad d = y_1 - y_Ц;$$
$$M_1 = x_3\,a - y_3\,c; \quad M_2 = x_Ц\,d - y_Ц\,b. \qquad (2.292)$$

Точку, представляющую цветность смеси на диаграмме цветностей, можно найти также графически, как показано на рис. 2.49. Здесь смесь цветов $Ц_1$ и $Ц_2$ изображается точкой $Ц_{1+2}$, лежащей на прямой, соединяющей точки $Ц_1$ и $Ц_2$ и делящей ее на отрезки, обратно пропорциональные числу трихроматических единиц T, т. е. модулям m_1 и m_2 цветов $Ц_1$ и $Ц_2$.

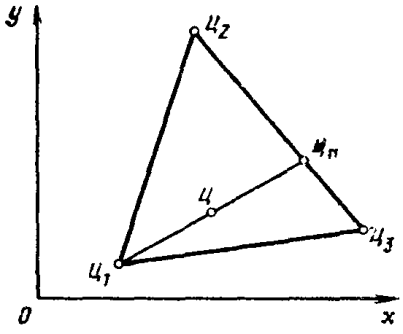


Рис. 2.48. К определению координат цветности цвета $Ц_п$

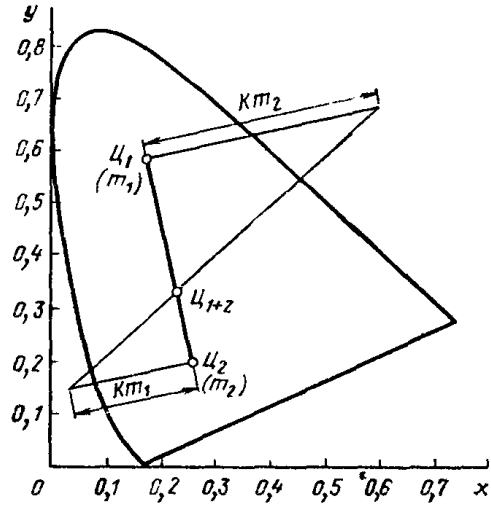


Рис. 2.49. К графическому определению цветности смеси $Ц_{1+2}$ цветов $Ц_1$ и $Ц_2$

как это следует нз (2.278). Для нахождеиня точкн $Ц_{1+2}$ проведем прямые, перпенднкулярные к лнннн $Ц_1\ Ц_2$ и пересекающне ее в точках $Ц_1$ и $Ц_2$. Длнны этнх прямых берем равиымн km_1 и km_2, где k — произвольное чнсло. Тогда прямая, соединяющая концы этнх прямых, пересекает прямую $Ц_1\ Ц_2$ в точке $Ц_{1+2}$.

Пример. Дан светофнльтр со спектральным пропускаинем τ_λ (табл. 2.7), освещаемый стаидартным источнинком белого цвета C со спектральной плотностью нзлучения P'_λ. Требуется иайтн координаты цветностн светового потока, прошедшего через этот светофильтр. Для этого находим $P''_\lambda = \tau_\lambda P'_\lambda$ для ряда длнн волн. Далее находим произведения $\bar{x} P''_\lambda$, $\bar{y} P''_\lambda$, $\bar{z} P''_\lambda$ (равиые $\Delta X/\Delta\lambda$, $\Delta Y/\Delta\lambda$, $\Delta Z/\Delta\lambda$, соответствеино), после чего находнм сумму величнн $\bar{x} P''_\lambda$ для всех выбранных волн. Аналогично находим суммы $\bar{y} P''_\lambda$ и $\bar{z} P''_\lambda$, которые равны $X/\Delta\lambda$, $Y/\Delta\lambda$, $Z/\Delta\lambda$, соответственно. Отсюда имеем $(X/\Delta\lambda) + (Y/\Delta\lambda) + (Z/\Delta\lambda) = m/\Delta\lambda$, где m — цветовой модуль. Затем определяем координаты цветностн $x = (X/\Delta\lambda)/(m/\Delta\lambda)$; $y = (Y/\Delta\lambda)/(m/\Delta\lambda)$; $z = (Z/\Delta\lambda)/(m/\Delta\lambda)$, как показаио в табл 2.7 и проверяем выполненне условия $x + y \quad z = 1$.

Суммы $X/\Delta\lambda = 4566{,}12$; $Y\ \Delta\lambda = 1347{,}56$;

$Z/\Delta\lambda = 25249.7$; $m/\Delta\lambda = (X+Y+Z)/\Delta\lambda - 31163{,}38/\Delta\lambda$;

$$x = \frac{X}{m} = \frac{\Delta\lambda 4566{,}12}{\Delta\lambda 31163{,}38} = 0{,}147; \quad y = \frac{Y}{m} = \frac{\Delta\lambda 1347{,}56}{\Delta\lambda 31163{,}38} = 0{,}043;$$

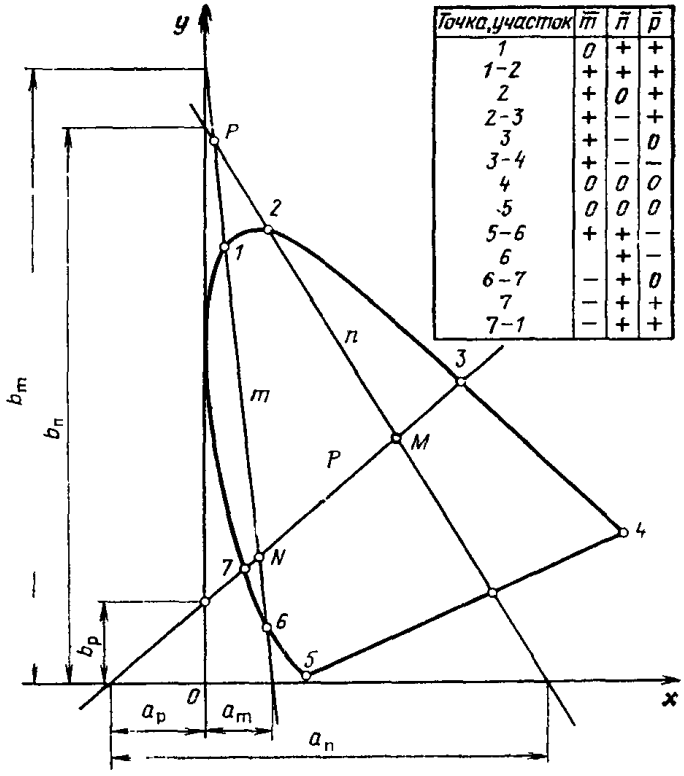
$$z = \frac{Z}{m} = \frac{\Delta\lambda 25249{,}7}{\Delta\lambda 31163{,}38} = 0{,}800.$$ Проверка: $x+y+z = 0{,}990$.

Таблица 2.7

, λ, нм	Спектральная характеристика			Произведение		
	Фильтр τ_λ	Источник света P'_λ	Источник света плюс фильтр $P''_\lambda = \tau_\lambda P'_\lambda$	$\bar{x} P''_\lambda$	$\bar{y} P''_\lambda$	$\bar{z} P''_\lambda$
380	0	33	0	0	0	0
400	6,3	63,3	399	5,7	0,16	27.2
420	40	98,1	3930	528	15,7	2540
440	50	121,5	6070	2115	139,5	10600
460	45	123,1	5540	1610	333	9250
480	25	123,9	3100	296	431	2520
500	10	112,1	1121	5,84	360	305
520	1	96,9	96,9	6,08	68,2	7,5
540	0	102,1	0	0	0	0

2.16. КРИВЫЕ СМЕШЕНИЯ

Определим зависимость формы кривых смешения от выбора основных цветов. На рнс. 2.50 показан треугольник некоторых основных цветов MNP в прямоугольной системе координат xy системы XYZ. Стороны этого треугольника, лежащие



Точка, участок	$\bar{m}$	$\bar{n}$	$\bar{p}$
1	0	+	+
1–2	+	+	+
2	+	0	+
2–3	+	−	+
3	+	−	0
3–4	+	−	−
4	0	0	0
5	0	0	0
5–6	+	+	−
6		+	−
6–7	−	+	0
7	−	+	+
7–1	−	+	+

Рис. 2.50. К определеиню формы кривых сложення. Справа в таблнце указаны знакн и нулевые значения удельных координнат для разных участков спектрального локуса

против вершин M, N, P, обозначены соответственно буквами m, n, p. Этими же буквами обозначим координаты цветности в системе основных цветов MNP. Д. Мак-Адам в 1953 г. показал, что каждая из кривых удельных координат $\bar{m}$, $\bar{n}$, $\bar{p}$ (и соответственно из кривых координат цветности m, n, p) определяется на диаграмме цветностей положением сторон m, n, p треугольника MNP.

На рис. 2.50 дана также таблица знаков удельных координат (т. е. количеств основных цветов в единицах T) $\bar{m}$, $\bar{n}$, $\bar{p}$, необходимых для согласования их смеси со спектральными цветами, находящимися в разных точках спектрального локуса. Для участка спектрального локуса между точками *1* и *2*, лежащего внутри треугольника MNP, значения удельных координат $\bar{m}$, $\bar{n}$, $\bar{p}$ положительны. Для участков, лежащих вне этого треугольника, одна или две из этих координат отрицательны.

Например, на участке *1—7* к спектральному цвету надо добавить основной цвет M, чтобы снизить его насыщенность и получить цвет их смеси, лежащий на стороне m, который можно согласовать смесью положительных количеств основных цветов P и N. К спектральному цвету, помещенному в точке *7*, надо добавить основной цвет M, чтобы получить цвет N, и в этом случае основной цвет P не нужен для согласования, поэтому в этой точке удельная координата $\bar{p} = 0$. На участке *7—6* к

спектральному цвету необходимо добавлять два основных цвета P и M (цвет их смеси лежит на стороне n), чтобы получить цвет N. Для остальных участков рассуждения аналогичны. Таким образом, удельная координата $\bar{m}$ отрицательна для участка локуса *1—7—6*, заключенного между точками его пересечения со стороной m (и ее продолжением) и лежащего против вершины M треугольника MNP вне его.

Удельная координата $\bar{p} < 0$ для участков спектрального локуса *3—4* и *5—7*, заключенных между точками пересечения локуса со стороной p (и ее продолжением) и лежащих против вершины P вне треугольника MNP. Аналогично удельная координата $\bar{n} < 0$ на участке *2 — 3 — 4*. Таким образом, координаты $\bar{m}$ и $\bar{p}$ отрицательны на участке *7—6*; координаты $\bar{p}$ и $\bar{n}$ отрицательны на участке *4—3*. На границах видимого спектра (точки *4* и *5*) координаты $\bar{m} = \bar{n} = \bar{p} = 0$, так как здесь нулевая яркость цвета.

В точках пересечения спектрального локуса со стороной m (или ее продолжениями) координата $\bar{m} = 0$. Аналогично в точках пересечения локуса со сторонами n, p координаты $n = p = 0$, потому что спектральный цвет в точке пересечения и два основных цвета лежат на одной прямой; такой спектральный цвет может быть согласован этими двумя основными цветами без участия третьего. Таким образом, в точках *3* и *7* координата $\bar{p} = 0$; в точках 1 и *6* $\bar{m} = 0$; в точке *2* имеем $\bar{n} = 0$.

Если одна, две или три стороны треугольника основных цветов находятся вне спектрального локуса, как показано на рис. 2.51, то положительные значения соответствующих им удельных координат зависят от расстояния между указанными сторонами и спектральным локусом в каждой его точке. Например, для рис. 2.51 координаты $\bar{m}$ и $\bar{n}$ для всего спектра положительны (так как стороны m и n находятся снаружи локуса), координата $\bar{p} > 0$ на участке *1 — 2 — 3 — 4*, а на участке *1 — 6 — 5 — 4* $\bar{p} < 0$. При движении от точки *1* к точке *3* координата $\bar{m}$ увеличивается, что соответствует изменению расстояния от стороны m до локуса. В точке касания стороны m спектрального локуса, как и в точке пересечения локуса с этой стороной, координата $\bar{m} = 0$. Сказанное аналогично и для координаты $\bar{n}$. Таким образом, кривые удельных координат $\bar{m}$ и $\bar{n}$ для рис. 2.51 являются одногорбыми и положительными, кривая $\bar{p}$ имеет три горба (два отрицательных на краях спектра и один положительный). Можно показать, что в системе основных цветов MNP

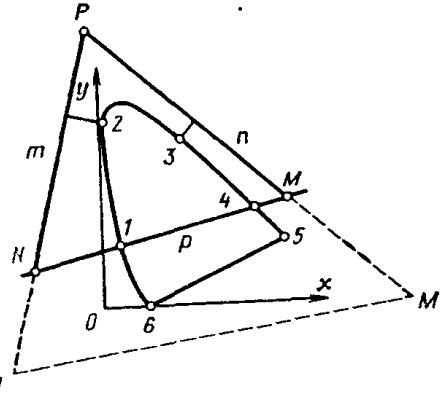


Рис. 2.51. К определению формы кривых сложения $\bar{m}$, $\bar{n}$, $\bar{p}$

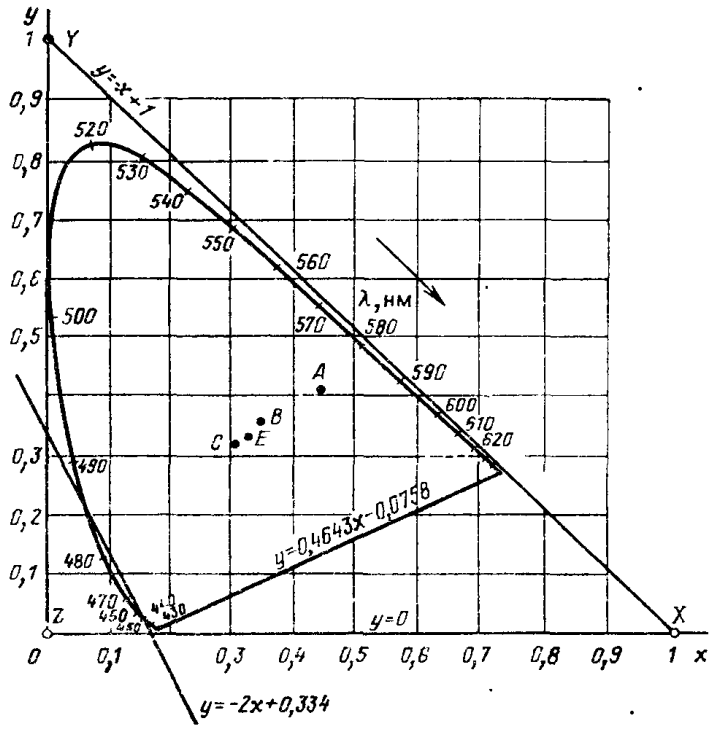


Рис. 2.52. К определению формы кривых сложения $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$

уравнение кривой смешения, т. е. зависимость $\bar{m}$ от длины волны):

$$\bar{m} = (1 - 1/a_m)\,\bar{x} + (1 - 1/b_m)\,\bar{y} + \bar{z}, \qquad (2.293)$$

где a_m и b_m — отрезки на осях x и y, отсекаемые стороной m треугольника MNP (см. рис. 2.50). В табл. 2.5 даны зависимости $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ от λ. Проверим сказанное на стандартных кривых сложения $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$, показанных на рис. 2.42.

На рис. 2.52 гипотенуза XY стандартного прямоугольного треугольника XYZ, соединяющая точки X ($x = 1$; $y = 0$) и ($x = 0$; $y = 1$), лежащая против вершины Z ($x = 0$; $y = 0$), выражается уравнением

$$y = -x + 1 \qquad (2.294)$$

и проходит на большом протяжении очень близко к спектральному локусу, не пересекая его. Гипотенузе XY соответствует одногорбая кривая сложения $\bar{z}$ (см. рис. 2.42). Сторона ZX прямоугольного треугольника, лежащая против вершины Y, выражаемая уравнением

$$y = 0, \qquad (2.295)$$

также не пересекает спектрального локуса и поэтому ей соответствует одногорбая кривая сложения $\bar{y}$ v_λ (см. рис. 2.42). Сторона ZY пря-

моугольного треугольнника, лежащая против вершины X, выражается уравнением

$$x = 0. \tag{2.296}$$

Сторона ZY наиболее близко подходит к спектральному локусу в точке с длиной волны 510 нм, ей соответствует двугорбая кривая $\bar{x}$ с минимумом, близким к нулю в этой точке (см. рис. 2.42). Линия пурпурных цветов, лежащая против вершины Y треугольника, выражается уравнением

$$y = 0{,}4643x - 0{,}0758 \tag{2.297}$$

и пересекает ось абсцисс в точке $x = a_m = 0{,}1634$. Линии пурпурных цветов соответствует одногорбая кривая сложения $\bar{y}_1$ (отличная от $\bar{y} = v_\lambda$).

Рассмотрим, как получается одногорбая кривая сложения. Из рис. 2.51 следует, что кривая $\bar{m}$ будет одногорбой и положительной, если сторона m лежит вне спектрального локуса и на всем ее протяжении кратчайшие расстояния от ее точек до локуса будут изменяться монотонно. Для этого необходимо, чтобы она была наиболее близка или касательна к локусу в его крайних точках (см. рис. 2. 51) *6* или *5*. Этому соответствует тот случай, когда сторона m параллельна линии пурпурных цветов (но не пересекает спектрального локуса) или совпадает с ней. Эти рассуждения справедливы также для кривых $\bar{n}$ и $\bar{p}$ (сторон n и p).

Чтобы получить выражение для кривой $\bar{m}$ в системе основных цветов MNP, нужно, зная расположение сторон m, n, p на диаграмме цветностей системы XYZ МКО — 1931 г., найти длину отрезков a_m и b_m на рис. 2.50 и подставить их значения в (2.293). Аналогично можно получить выражения для кривых $\bar{n}$, $\bar{p}$.

Для практических целей можно выбирать кривую $\bar{m}$ так, чтобы второй ее горб был во много раз меньше основного, т. е. сделать кривую практически одногорбой. Этому условию будут соответствовать касательные к спектральному локусу на участке 460 ... 400 нм и близко расположенные к ним параллельные им прямые как пересекающие локус, так и лежащие вне его. Совокупность таких прямых занимает обширную область, заключенную между линией пурпурных цветов и касательной к спектральному локусу в точке с длиной волны 460 нм. Одна из таких прямых, пересекающая локус в точках, близких к точке 462 нм и лежащих

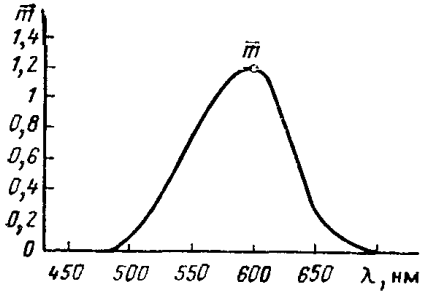


Рис. 2.53. Графики кривой сложения $\bar{m}$

по обе стороны от нее, была выбрана в 1955 г. Д. А. Шкловером и Р. С. Иоффе для использования в объективном колориметре. Эта прямая выражается уравнением

$$y = -2x + 0{,}334. \tag{2.298}$$

Этой прямой соответствует кривая сложения (рис. 2.53)

$$\bar{m} = 0{,}883\,\bar{x} + 0{,}333\bar{y} - 0{,}167\bar{z}, \tag{2.299}$$

которая была выбрана в качестве характеристики спектральной чувствительности указанного колориметра. Две другие его характеристики спектральной чувствительности были взяты в виде $\bar{p} = \bar{y}$ и $\bar{n} = \bar{z}$.

2.17. ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦВЕТА

При восприятии цвета $Ц$ три селективных приемника глаза стандартного наблюдателя МКО получают возбуждения, которые можно обозначить $R_ф$, $G_ф$, $B_ф$ и рассматривать их как координаты цвета $Ц$ в физиологической системе определения цвета $R_ф G_ф B_ф$. Кривые сложения $\bar{r}_ф$, $\bar{g}_ф$, $\bar{b}_ф$ являются спектральными характеристиками трех воспринимающих приемников зрительного аппарата наблюдателя [17]. Е.Н. Юстова показала, что основные цвета $R_ф$, $G_ф$, $B_ф$ этой системы имеют следующие координаты цветности в системе XYZ МКО—1931 г:

$$x_{Rф} = 0{,}747;\ y_{Rф} = 250;\ x_{Gф} = 1{,}720;$$
$$y_{Gф} = 0{,}720;\ x_{Bф} = 0{,}174;\ y_{Bф} = 0{,}005. \tag{2.300}$$

Формулы перехода от координат цвета в системе XYZ к его координатам в системе $R_ф G_ф B_ф$ имеют вид:

$$R_ф = 0{,}318X + 0{,}754Y - 0{,}072Z;$$
$$G_ф = -0{,}463X + 1{,}374Y - 0{,}089Z;\ B_ф = Z. \tag{2.301}$$

2.18. ЛОКУС ЦВЕТНОСТЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА

Абсолютно черным называется тело (АЧТ), поглощающее весь падающий поток лучистой энергии. Излучение АЧТ зависит только от его температуры. В пределах видимого спектра цветность излучения АЧТ определяется его *цветовой температурой* T_c, задаваемой в кельвинах. Излучение АЧТ подчиняется законам Вина, Стефана—Больцмана и Планка. Максимум спектральной плотности мощности излучения с единицы поверхности АЧТ соответствует длине волны λ_m, связанной с его абсолютной температурой T *формулой смещения Вина*

$$\lambda_m T = b, \tag{2.302}$$

где T, К; λ, см; $b = 0{,}2896$, см·град.

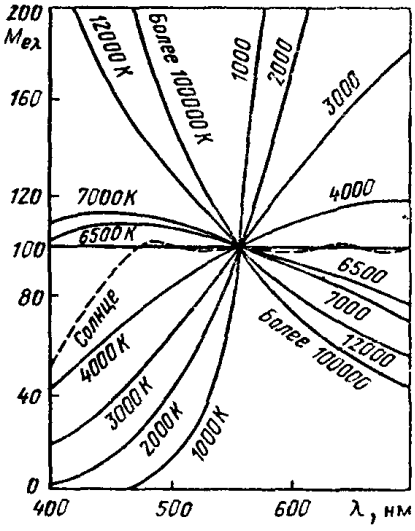


Рис. 2.54. Распределение поверхностей плотности мощности в спектре излучения АЧТ при различных температурах

Поверхностная плотность мощности излучения АЧТ, эрг·см$^{-2}$·с$^{-1}$ (энергетическая светимость) (см. табл. 1.3) определяется *формулой М. Планка* в интервале длин волн 1 нм

$$M_{e\lambda} = C_1 \lambda^{-5}/(e^a - 1);\ a = C_2/(\lambda T), \quad (2.303)$$

где λ нм; $C_1 = 3{,}742 \cdot 10^{23}$; $C_2 = 1{,}438 \times \times 10^7$ (C_1 и C_2 — раднационные постоянные).

На рис. 2.54 представлены зависимости $M_{e\lambda}$ от λ и T в пределах видимого спектра, причем за единицу $M_{e\lambda}$ приняты значения на длине волны $\lambda = 555$ нм при всех значениях T. Если известно распределение по спектру величины $M_{e\lambda}$ для АЧТ, то, пользуясь (2.255) и (2.251), можно рассчитать координаты цветности x, y, z цветности излучений АЧТ при различных его температурах T. На диаграмме цветностей xy (рис. 2.55) показаны расчетные точки, соответствующие цветностям АЧТ при различных температурах, которые соединены плавной кривой, называемой *локусом цветностей АЧТ*. В табл. 2.8 приведены цветовые температуры T_c некоторых источников света.

Таблица 2.8

Источник света	T_c, K
Пустотная лампа накаливания с вольфрамовой нитью 50 Вт, 10 лм на 1 Вт	2500
Газонаполненная лампа накаливания с вольфрамовой нитью 1000 Вт, 20 лм на 1 Вт	2980
Люминесцентная лампа белого света	3500
Дуговая лампа (чистые угли)	3780
Газонаполненная лампа накаливания дневного света	4000
Прямой солнечный свет у поверхности Земли летом в полдень	5500
Люминесцентная лампа дневного света	6000
Солнечный свет до поглощения атмосферой	6500
Облачное небо	6500
Голубое небо	19 000...24 000

Цветность дневного света зависит от многих факторов: времени года и дня, места и высоты точки наблюдения на земном шаре, состояния облачности, условий наблюдений. На рис. 2.56 показаны зависимости

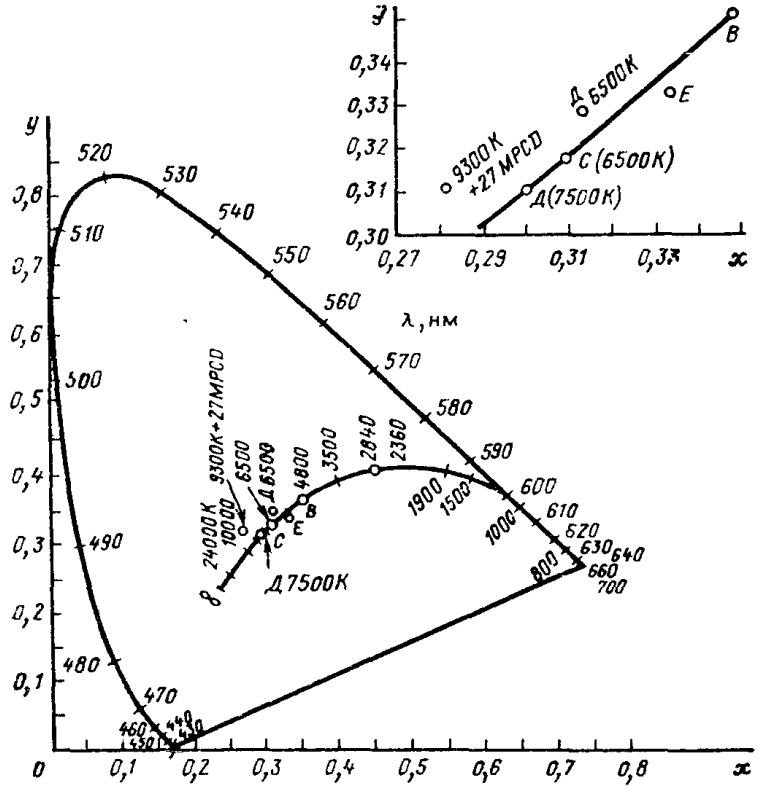


Рис. 2.55. Локус цветностей излучений АЧТ при различных его температурах (справа показана часть локуса в увеличенном масштабе)

P_λ (т. е. $M_{e\lambda}$) от λ для солнечного света. Координаты цветности дневного света и некоторых искусственных источников света даны в табл. 2.9.

Таблица 2.9

Источник света	x	y	z
Средний солнечный свет	0,336	0,350	0,314
Средний дневной свет	0,313	0,328	0,359
Дневной свет северного неба	0,277	0,293	0,430
Небо в зените	0,263	0,332	0,459
Пламя угольной дуги	0,315	0,332	0,353
Люминесцентная лампа (4500 К)	0,539	0,363	0,278
Люминесцентная лампа (3500 К)	0,404	0,396	0,200

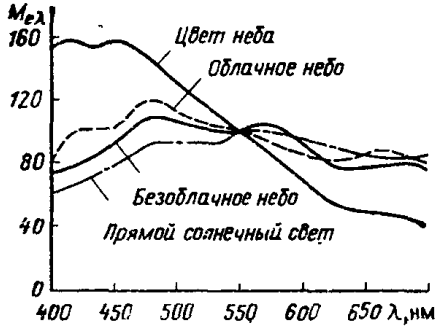


Рис. 2.56. Распределение поверхностной плотности мощности в спектре солнечного света

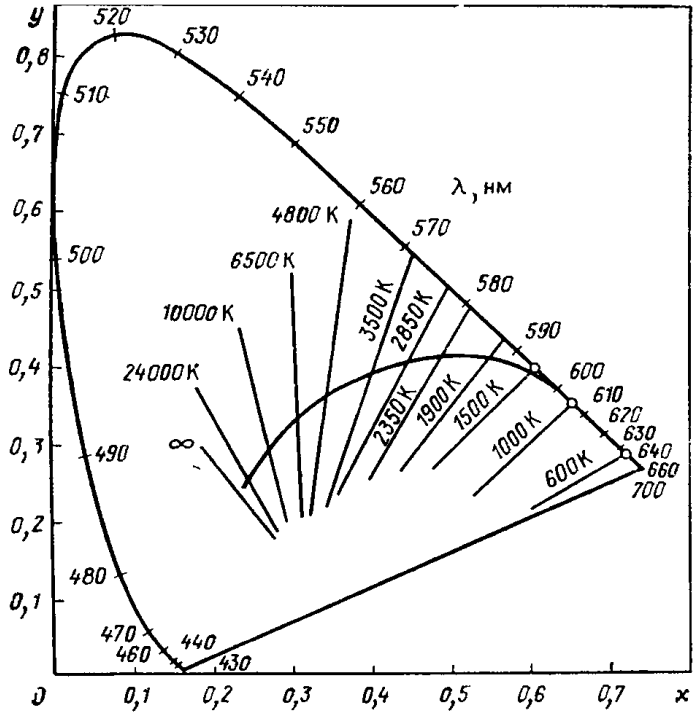


Рис. 2 57. Линии коррелнрованных цветовых температур

С помощью цветовой температуры можно точно определять только цветности, лежащие на локусе цветностей АЧТ, но не других цветностей. Для цветностей, лежащих вблизи этого локуса, под цветовой температурой T_c понимают *коррелированную цветовую температуру*, т.е. абсолютную температуру АЧТ такой точки на локусе цветности АЧТ, которая удалена от точки, представляющей заданную цветность, на наименьшее число *цветовых порогов* (т. е. едва заметных различий Приближенно-это есть точка пересечения локуса цветности АЧТ с нормалью l, опущенной на него (на равноконтрастной диаграмме, о которой будет сказано позже) из точки заданной цветности. С увеличением длины нормали точность такого определения цветности снижается. На рис. 2.57 показаны линии коррелированных цветовых температур (*изотемпературные прямые*). Обратная величнна (т. е. $1/T_c$) называется *миред*, а величина $10^6/T_c$ — *обратный микроградус* и обозначается r МК. Например, еслн $T_c = 3000$ К, то $10^6/T_c = 10^6 \cdot 1/3000 = 10^6 \cdot 10^{-6} \cdot 333{,}3 = 333{,}3r$ МК или $1/3000 \cdot 10^{-6} \cdot 333{,}3$ мнред. Понятне T_c удобно тем, что оно одной цифрой характеризует данную цветность. Однако, так как данному значенню T_c может соответствовать множество распределений $M_{e\lambda}$ (или P_λ), то T_c не является полной н надежной характеристикой цвета излучения.

2.19. СТАНДАРТНЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА МКО

В 1931 г. МКО в дополнение к равноэнергетическому белому цвету E ввела в практику три стандартных источника света (*стандартные излучения МКО*) обозначаемые A, B, C. В дальнейшем были введены еще источники дневного света D_{55}, D_{65}, D_{75} с цветовыми температурами 5500, 6500 и 7500 К и источник S. В телевидении для характеристики цветных кинескопов применяется также белый цвет 9300 К + 27 MPCD, где MPCD — принятое в литературе сокращенное (Minimum Perceptible Colour Difference) название порога изменения ощущения — величины, которая будет объяснена ниже, 27 MPCD — обозначение сдвига этого белого цвета на диаграмме цветностей на 27 средних цветовых порогов. В табл. 2.10 даны координаты цветности стандартных источников белого света.

Таблица 2.10

Источник	Координаты цветности			Цветовая температура T_c, К
	x	y	z	
A	0,44757	0,40745	0,14498	2848
B	0,34842	0,35161	0,29997	4800
C	0,31006	0,31616	0,37378	6500
E	0,33333	0,33333	0,33333	5700
D_{55}				5500
D_{65}	0,313	0,329	0,358	6500
D_{75}	0,3003	0,3103	0,3894	7500
S	0,25	0,25	0,50	25000
9300 К + 27 MPCD	0,281	0,311	0,408	9300

Под дневным светом обычно понимается свет от ясного неба, прямой солнечный свет, свет облачного неба ($x = 0{,}250$ ... $0{,}380$). Цветовая температура для источника A была позже изменена на 2856 К, для источника B на 4874 К (прямое солнечное излучение), для источника C на 6774 К. Источники B и C выходят из употребления, вместо них применяется источник белого цвета D_{65} — средний дневной свет. На рис. 2.55 показаны цветности источников A, B, C, E, D_{65}, 9300К + + 27 MPCД. В табл. 2.11 даны распределения относительной плотности мощности P'_λ в спектре излучений этих источников.

На рис. 2.58 даны спектральные характеристики распределения мощности (в относительных единицах) в излучениях стандартных источников.

В табл. 2.12 приведены качественные характеристики излучения этих источников.

Источники B, C, E, $Д$ обычно получаются путем добавления светофильтров к источнику A. Под *цветопередачей источника освещения* понимают его влияние на восприятие цвета освещенных предметов по

Таблица 2.11

λ, нм	P'_λ					
	A	*B*	*C*	9300 K – 27 MPCD	3200 K	D_{65}
380	9,79	22,40	33,00	26,139	0,0955	0,4244
390	12,09	31,30	47,40	25,528	0,1142	0,4635
400	14,71	41,30	63,30	24,887	0,1397	0,7039
410	17,68	52,10	80,60	24,222	0,1548	0,7767
420	21,00	63,20	98,10	23,542	0,1784	0,7929
430	24,67	73,10	112,40	22,853	0,2031	0,73598
440	28,70	80,80	121,50	22,159	0,2296	0,8905
450	33,09	85,40	124,00	21,466	0,2576	0,9932
460	37,82	88,30	123,10	20,777	0,2864	1,000
470	42,87	92,00	123,80	20,096	0,3189	0,9754
480	48,25	95,20	123,90	19,424	0,3483	0,9839
490	53,91	96,50	120,70	18,765	0,3797	0,9236
500	59,86	94,20	112,10	18,120	0,4126	0,9287
510	66,06	90,70	102,30	17,490	0,4458	0,9151
520	72,50	89,50	96,90	16,876	0,4793	0,8896
530	79,13	92,20	98,00	16,279	0,5125	0,9143
540	85,95	96,90	102,10	15,699	0,5466	0,8862
550	92,91	101,00	105,20	15,137	0,5590	0,8828
560	100,00	102,80	105,30	14,593	0,6133	0,8489
570	107,18	102,60	102,30	14,067	0,6456	0,8175
580	114,44	101,00	97,80	13,559	0,6789	0,8132
590	121,73	99,20	93,20	13,069	0,7112	0,75297
600	129,04	98,00	89,70	12,596	0,7412	0,7640
610	136,34	98,50	88,40	12,141	0,7713	0,7606
620	143,62	99,70	88,10	11,702	0,8010	0,7445
630	150,83	101,00	88,00	11,297	0,8297	0,7071
640	157,98	102,90	87,80	10,873	0,8577	0,7105
650	165,03	103,90	88,20	10,482	0,8479	0,6791
660	171,96	105,00	87,90	10,106	0,9109	0,6978
670	178,77	104,90	86,30	9,744	0,9334	0,6986
680	185,43	103,90	84,00	9,396	0,9573	0,6647
690	191,93	101,60	80,20	9,063	0,9799	0,5917
700	198,26	99,10	76,30	8,742	1,000	0,6078
710	204,41	96,20	72,40		1,0194	0,6307
720	210,36	92,90	68,30		1,0390	0,5229
730	216,12	89,40	64,40		1,0814	0,5934
740	221,66	86,90	61,50	—	1,0724	0,6375
750	227,00	85,20	59,20	—	1,0862	0,5399
760	232,11	84,70	58,10	—	1,1011	0,3939
770	237,02	85,40	58,20	—	1,1133	0,5671
780	241,67	87,00	59,10	—	1,1236	0,5382

Таблица 2.12

Источник	Характеристика излучения
A	Излучение вольфрамовой лампы накаливания (средний искусственный свет)
B	Прямой полуденный солнечный свет (искусственный дневной свет)
C	Рассеянный солнечный свет (смешанный свет излучения Солнца и неба) при малооблачном небе. Близок к среднему дневному свету солнечного неба (искусственный дневной свет)
E	Спектр излучения является равноэнергетическим (равноэнергетическое, равностимульное белое)
D_{65}, D_{75}	Цвет облачного неба
S	Цвет голубого неба

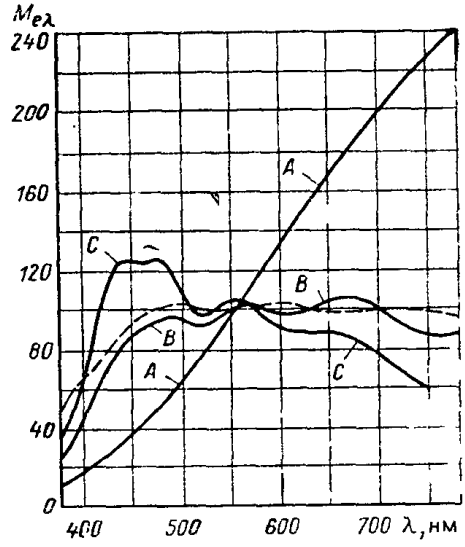


Рис. 2.58. Распределение поверхностной плотности мощности в спектре излучения стандартных источников белого света A, B и C и в дневном солнечном свете (штриховая линия)

сравнению с выбранным стандартным источником. При этом считается, что освещение должно украшать предмет (цвет лица и рук, различные товары, овощи, цветы, пища и др.).

2.20. ВОСПРИЯТИЕ ЦВЕТОВЫХ РАЗЛИЧИЙ

До сих пор мы рассматривали законы колориметрии, относящиеся к смешению цветов (цветовым смесям) и соответствующие свойствам зрения при согласовании (уравнивании) цветов. Эту часть колориметрии называют *низшей метрикой цвета* в отличие от *высшей метрики цвета*, под которой понимается часть колориметрии, относящаяся к изучению отличий между цветами. К высшей метрике цвета относятся понятия о цветовом пороге и о мере различия между цветами (т. е. о различии ощущений при восприятии различных цветов).

Порогом изменения ощущения (обозначаемым МРСД или МЦП[1]) называется наименьшее (едва заметное) изменение ощущения, испытываемое наблюдателем. Если известен такой порог, можно определить число минимальных порогов между ощущениями от двух разных раздражителей. Это число можно считать мерой различия ощущений от этих раздражителей. В высшей метрике цвета при переходе от одного цвета к другому число порогов изменения цветощущения зависит от условий наблюдения (яркости, углового размера объекта, яркости и цветности фона и т. д.) и от выбора пути перехода в цветовом пространстве от одного цвета к другому. Оказывается, что путь в цветовом пространстве,

[1] Минимальный цветовой порог.

содержащий наименьшее число порогов изменения ощущения, не прямолинеен, а криволинеен. Изменения цветности мы замечаем только, если они больше (или равны) цветового порога. Если в системе XYZ МКО — 1931 г. dx и dy пороговые изменения координат x, y цветности $Ц_1$, в результате которых получается новая цветность $Ц_2$ с координатами цветности x dx, y dy, визуально отличающаяся от $Ц_1$ с вероятностью p (обычно p 0,5 или 0,75), то расстояние между точками $Ц_1$ и $Ц_2$ на диаграмме цветностей, т. е. *пороговое расстояние*

$$dS = \sqrt{dx^2 + dy^2}. \qquad (2.304)$$

С ростом числа цветовых порогов между двумя цветностями *цветовой контраст* между этими цветностями увеличивается.

Так как плоскость xy не является плоскостью постоянной яркости, то переход от цветности $Ц_1$ к $Ц_2$ сопровождается изменением яркости. Только переходы, путь которых параллелен алихне, т. е. оси Ox, обеспечивают сохранение яркости, так как при этом координата цвета Y не изменяется. Полное число цветовых порогов между двумя цветами

$$n = \sqrt{(\Delta C)^2 + a(\Delta L)^2}, \qquad (2.305)$$

где ΔC и ΔL — различие (число порогов) по цветности и по яркости соответственно; a — коэффициент пропорциональности.

Если в цветовом пространстве даны два цвета $Ц_1$ и $Ц_2$ с координатами x_1, y_1, z_1 и x_2, y_2, z_2 соответственно, то пороговое расстояние между ними

$$dS = [g_{11}(dx)^2 + g_{22}(dy)^2 + g_{33}(dz)^2 + 2g_{12}dxdy + \\ + 2g_{23}dydz + 2g_{31}dzdx]^{1/2}, \qquad (2.306)$$

где $x_2 = x_1 + dx$; y_2 $y_1 + dy$; z_2 $z_1 + dz$; (2.307)

коэффициент g зависит от x_1, y_1, z_1.

Уравнение (2.306) определяет так называемый *линейный элемент*) в трехмерном римановом пространстве. В эвклидовом пространстве с прямоугольными ортами пороговое расстояние dS находят, подставив в (2.306) g_{11} g_{22} g_{33} 1 и g_{12} g_{23} g_{31} 0:

$$dS = [(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2]^{1/2}. \qquad (2.308)$$

Если цвета $Ц_1$ и $Ц_2$ лежат на плоскости xy в эвклидовом пространстве с косоугольными ортами, то dz 0 и

$$dS \quad [g_{11}(dx)^2 + g_{22}(dy)^2 + 2g_{12}dxdy]^{1/2}, \qquad (2.309)$$

где dx и dy — пороговые изменения координат цветности цветов $Ц_1$ и $Ц_2$.

Не каждый наблюдатель может заметить различие в цветах, являющееся минимальным цветовым порогом. Поэтому вводят понятие *среднего цветового порога* (СЦП) для группы наблюдателей и *среднеквадратического отклонения* (СКО) их ошибок ощущений при согласовании

каждых двух цветов. Приняты следующие соотношения между этими мерами цветоощущений: 1СКО = 3 МЦП 3 MPCD; 1СЦП — 10 МЦП = 10 МРСД ≈ 3 СКО. Величина dS из (2.309) может быть в зависимости от выбора коэффициентов g выражена через МЦП, СКО, СЦП. Кратчайший путь перехода в цветовом (римановом) пространстве от $Ц_1$ к $Ц_2$ — криволинеен, а поэтому большое цветовое различие ΔS между двумя цветами есть интеграл от dS по этой кривой, называемой *геодезической линией*. Г. Гельмгольц в 1866 г. пытался определить dS (2.306) на основе закона Вебера — Фехнера и трехкомпонентной теории цветового зрения и получил для линейного элемента [2]:

$$dS = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\left(\frac{dR}{R} \right)^2 + \left(\frac{dG}{G} \right)^2 + \left(\frac{dB}{B} \right)^2 \right]^{1/2}, \qquad (2.310)$$

где R, G, B — реакции колбочек глаза.

Расчет dS по (2.310) дал хорошее совпадение с результатами измерений А. Кенига и К. Дитеричи (1884 г.). Э. Шредингер предложил в 1920 г. следующее выражение для линейного элемента

$$dS = \frac{1}{\sqrt{h}} \left[\frac{a_1}{R} (dR)^2 \quad \frac{a_2}{G} (dG)^2 + \frac{a_3}{B} (dB)^2 \right]^{1/2}, \qquad (2.311)$$

где светлота $h \quad a_1 R + a_2 G + a_3 B$.

В. Стайлс в 1946 г. предложил [2] следующую формулу при больших яркостях:

$$dS - \left[\left(\frac{dR}{a_4 R} \right)^2 \quad \left(\frac{dG}{a_5 G} \right)^2 \quad \left(\frac{dB}{a_6 B} \right)^2 \right]^{1/2}. \qquad (2.312)$$

Здесь a_1, a_2, ..., a_6 — постоянные коэффициенты.

2.21. РАВНОКОНТРАСТНАЯ ДИАГРАММА ЦВЕТНОСТЕЙ *UV* МКО — 1960 г.

По имеющимся данным о чувствительности зрения к изменениям цветности Д. Джадд (США) в 1933 г. [90] построил на диаграмме x, y радиусы-векторы, направленне которых соответствует направлению изменений цветности, а длина равна 100 MPCD при нормальных условиях наблюдения (поле зрения 6 , яркость 10 ... 80 кд/м^2). На рис. 2.59 эллипсы Джадда представляют собой огибающие концов радиусов-векторов, построенных из центров эллипсов. Оказалось, что в различных областях диаграммы цветностей x, y цветовые пороги представляются отрезками разной длины и пути перехода на ней от одной цветности к другой, содержащие наименьшее число таких порогов, не являются прямолинейными. В результате этого в области синих цветов число различных цветностей, приходящихся на единицу площади диаграммы, в 400 раз больше, чем в области зеленых цветов. Такая неоднородность диаграммы объясняется тем, что наше зрение воспринимает изменения координат цветности x, y не по линейному закону. Поэтому

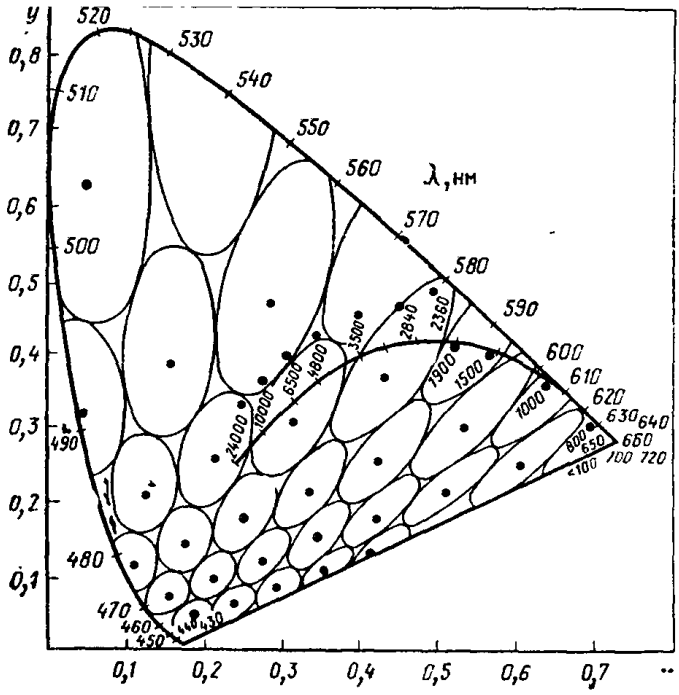


Рис. 2.59. Эллипсы равного числа цветовых порогов по Д. Джаду (расстояние от точки на эллипсе до его центра равно 100 МРСД)

концы отрезков, содержащих равное число цветовых порогов, исходящих по всем направлениям из данной точки на диаграмме цветностей x, y, располагаются не на окружности, а на эллипсе. В различных областях этой диаграммы эллипсы имеют разные размеры при равном числе цветовых порогов, что является ее свойством (рис. 2.59), а не свойством зрения. Таким образом, хотя на диаграмме x, y расстояние между двумя точками всегда является критерием различия цветностей, соответствующих этим точкам, по нему нельзя точно судить о числе цветовых порогов. Это является недостатком такой диаграммы.

Если изменения цветности сопровождаются изменениями яркости, то эллипсы на плоскости следует заменить эллипсоидами, расположенными в цветовом пространстве. При уменьшении значения освещенности сетчатки глаза ниже 100 фн (яркость наблюдаемой поверхности менее 100 кд/м^2) ощущение различия цветностей ослабляется быстрее, чем ощущение различий яркости.

Д. Мак-Адам в 1939 г. [81] провел экспериментальное изучение чувствительности глаза к изменениям цветности и результаты представил на диаграмме цветностей xy МКО-1931 г. (рис. 2.60). Условия эксперимента: угловые размеры поля и фона 2 и 42°; яркости поля и фона 50 и 25 кд/м^2, соответственно; наблюдения велись через отверстие диаметром 2,6 мм. Во время опытов наблюдатель 50 раз визуально согласовывал выбранные два цвета (согласовывались пары цветов, находящиеся в 25 различных точках диаграммы xy. В каждой такой точке цветность изменяли в разных направлениях, но яркость оставалась постоянной) По показаниям шкалы прибора вычислялн СКО для всех исследован-

ных цветов (по теорнн Э. Шреднигера чнсло цветовых порогов между двумя цветностями можно счнтать пропорцнональным СКО). Эллнпсы на рнс. 2.60 представляют собой огнбающне концов раднусов-векторов, построенных в 25 точках днаграммы, причем нх длнна в 10 раз больше, чем СКО (для наглядности), т. е. равна прнблнзнтельно 30 MPCD, а направленне соответствует направленню нзменення цветности. Эти эллипсы аналогичны эллнпсам Джадда (см. рнс. 2.59). Использованне плоскостн xy обосновано тем, что зренне менее чувствнтельно к нзменениям координаты цветностн чем к нзменениям координнат x и y (т. е. если перенестн эллипсы с рис. 2.60 на плоскости yz или zx, то нх размеры будут больше). Днаграмма на рнс. 2.60 дает информацню о том, какова длнна порогового расстояння (т. е. равного 1 MPCД) в разных областях днаграммы цветностей xy.

Для устранения указанного выше недостатка днаграммы цветностей x, y МКО — 1931 г. целесообразно создать такую диаграмму цветностей, в которой цветовые порогн (прн нензменной яркостн) во всех направлениях выражаются отрезками прямой постоянной длнны, независнмо от нх места на этой днаграмме. Такая диаграмма получила названне *равноконтрастной диаграммы цветностей* (в зарубежной лнтературе обозначается UCS — Uniform Chromaticity Scale). На равно-

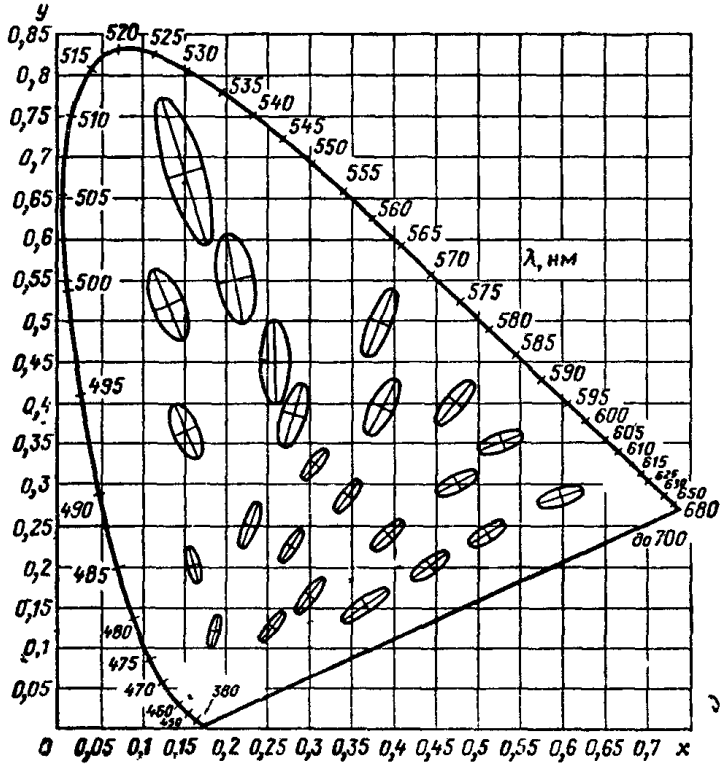


Рис. 2.60. Эллипсы равнозаметных различнй цветностей по Д. Мак-Адаму (длн на осей эллипсов равна 60 MPCD)

контрастной диаграмме зона равнозаметных изменений цветности представляет собой окружность, в пределах которой изменения цветового тона и насыщенности цвета одинаково заметны. Однако оценивая допустимые изменения цветности, не всегда можно считать изменения цветового тона и насыщенности одинаково важными.

Равноконтрастная диаграмма цветностей может быть получена из диаграммы цветностей x, y заменой одних основных цветов X, Y, Z другими U, V, W с тем, чтобы сократить область зеленых цветов, для которых размеры эллипсов Джадда большие, и расширить область синих цветов, где их размеры малы. Для этого выбирают такое расположение единичной плоскости в системе новых основных цветов U, V, W, чтобы все эллипсы на диаграмме цветностей в системе XYZ спроецировались на нее из центра проекции в окружности одинакового диаметра (*проективное преобразование*) [96—100]. Такую равноконтрастную диаграмму в прямоугольных координатах u, v построил Д. Мак-Адам, пользуясь уравнениями

$$U = \frac{2}{3}X;\ V = Y;\ W = 1{,}5Y - 0{,}5X + 0{,}5Z, \tag{2.313}$$

откуда в системе UVW модуль цвета

$$m = U + V + W = (1/6)\,(X + 15Y + 3Z). \tag{2.314}$$

Координаты цветности (дробно-линейные зависимости):

$$u = U/m = (2/3)\,X/m = 4X/s = 2x/t;$$
$$v = V/m = Y/m = 6Y/s = 3y/t;$$
$$w = 1 - (u + v);\ s = X + 15Y + 3Z;\ t = 6y - x + 1{,}50. \tag{2.315}$$

Из (2.315) получим обратное преобразование

$$x = 1.50u/N;\ y = v/N;\ z = 1 - (x + y);$$
$$N = u - 4v + 2. \tag{2.316}$$

Равноконтрастная диаграмма цветностей Д. Мак-Адама (рис. 2.61) построена в прямоугольной системе координат uv (на ней нанесена сетка значений x, y) путем проективного преобразования диаграммы цветностей xy. Эта диаграмма в 1960 г. рекомендована МКО в качестве весьма точной равноконтрастной диаграммы (длина отрезка, представляющего 10 MPCD, здесь равна 0,0038, в тех же единицах, в которых u и v) и получила название *диаграммы цветностей системы МКО—1960 г.* На этой диаграмме число цветовых порогов MPCD, отделяющих точку, представляющую данную цветность $Ц$, от локуса цветностей АЧТ находят по длине нормали l, опущенной на этот локус из точки $Ц$. Длину l измеряют в единицах, в которых даны координаты u и v и затем делят на 0,00038. Частное от деления дает число цветовых порогов MPCD в отрезке l. Если эллипсы Д. Мак-Адама или Д. Джадда построить на равноконтрастной диаграмме, то равновеликих кругов на ней с большой точностью получить не удается, что подтверждает приближенный характер этой диаграммы.

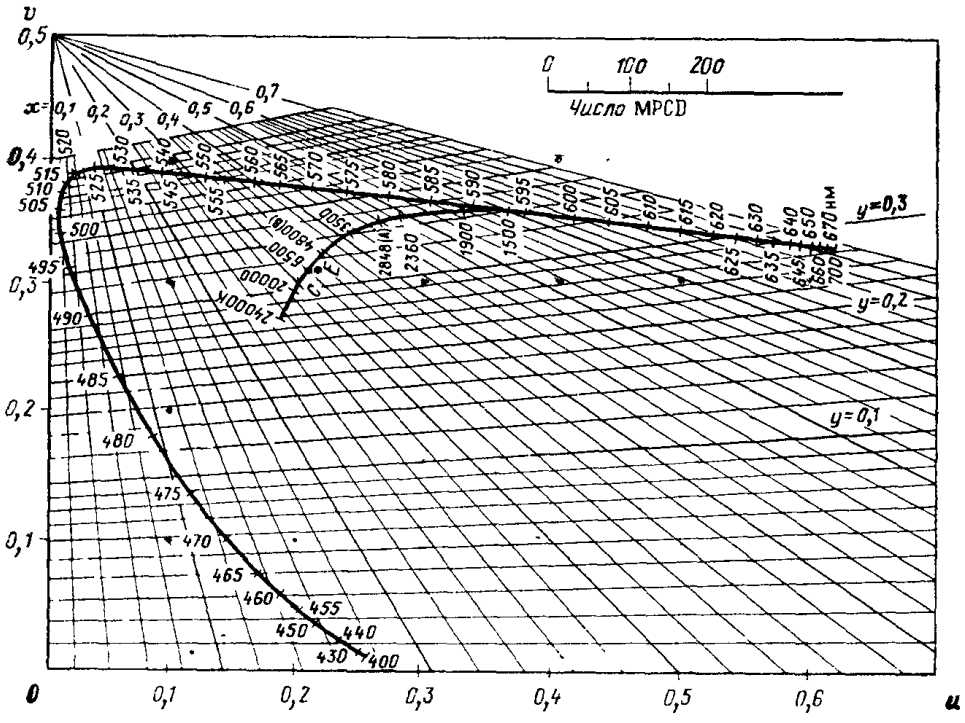


Рис. 2.61. Равноконтрастная диаграмма Д. Мак-Адама МКО — 1960 г. (равные линейные отрезки на диаграмме соответствуют равному различию между цветами одинаковой яркости)

В 1941 г. В. Д. Райт экспериментально определил и построил на равноконтрастной диаграмме Д. Мак-Адама отрезки, равные 30 MPCD, как показано на рис. 2.62. Здесь отношение длины максимального отрезка к минимальному, равно 2:1 (на диаграмме xy такое отношение равно 20:1). Во избежание этой неравномерности следует проецировать диаграмму xy не на плоскость, а на криволинейную поверхность с выпуклостью в центре.

В 1969 г. Д. Мак-Адам построил этим методом криволинейную диаграмму цветностей $\xi\eta$, применив нелинейное преобразование диаграммы xy (на диаграмме $\xi\eta$ линии x, y — кривые, а не прямые, как на рис. 2.61). Для представления основных цветов U, V, W на диаграмме цветностей xy системы XYZ напишем цветовое уравнение для единичного количества цвета в системе UVW

$$(Ц) = u\,(U) + v\,(V) + w\,(W). \qquad (2.317)$$

Учитывая $u + v + w = 1$, имеем при v w 0 u 1, $(Ц) =$ (U). Тогда из (2.317) получим

$$u = 2x/(6y - x + 1{,}50) = 1;\ v = 3y/(6y - x + 1{,}50) = 0. \qquad (2.318)$$

Из второго уравнения (2.318) следует y 0. Подставив y 0 в первое уравнение (2.318), получим $2x = -x + 1{,}5$, откуда x 0,5. Таким образом, цвет (U) имеет на диаграмме xy координаты x 0,5;

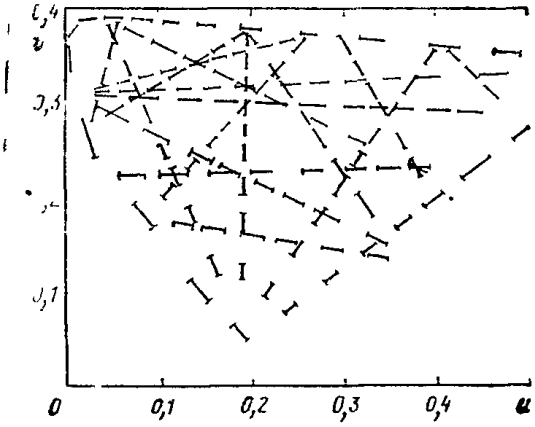


Рис. 2.62. Пороги цветоразличения по В. Д. Райту, построенные на равноконтрастной диаграмме Д. Мак-Адама

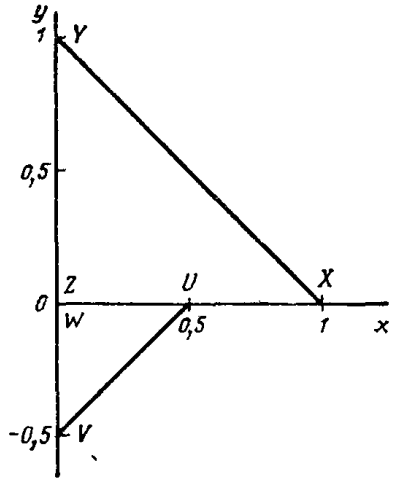


Рис. 2.63. Основные цвета U, V, W на диаграмме x, y (по Д. Мак-Адаму)

$y = 0$. Расположение его показано на рис. 2.63 точкой U. Аналогично при $u = w = 0$ имеем $v = 1$ и $(Ц) = (V)$ и из (2.315) имеем

$$v = 3y/(6y - x + 1{,}50) = 1,\ u = 2x/(6y - x + 1{,}50) = 0, \qquad (2.319)$$

откуда $x = 0$ и $y = -0{,}5$. Таким образом, цвет V имеет координаты $x = 0$, $y = -0{,}5$ и представлен точкой V. Аналогично, если $u = v = 0$, то $w = 1$ и $(Ц) = (W)$ и из (2.315) имеем $x = y = 0$ для цвета W (рис. 2.63, точка W). Цвета U, V, W образуют цветовой треугольник UVW. Подставив $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ в (2.313) вместо X, Y, Z, получим в системе UVW МКО-1960 г. удельные координаты

$$\bar{u} = 2\bar{x}/3;\ \bar{v} = \bar{y};\ \bar{w} = 1{,}5\bar{y} - 0{,}5\bar{x} + 0{,}5\bar{z} = 0{,}5\,(-\bar{x} + 3\bar{y} + \bar{z}), \qquad (2.320)$$

т. е. $\bar{u}$ и $\bar{v}$ изменяются с длиной волны λ так же, как $\bar{x}$ и $\bar{y}$.

Изменение координаты $\bar{w}$ в зависимости от длины волны показано на рис. 2.64, а значения даны в табл. 2.13.

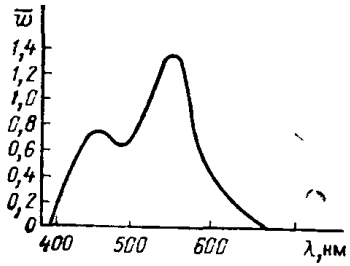


Рис. 2.64. Удельная координата $\bar{w}$ (по Д. Мак-Адаму)

Таблица 2.13

λ, нм	$\bar{w}$	λ, нм	$\bar{w}$	λ, нм	$\bar{w}$
380	0,0026	520	1,0725	660	0,0091
400	0,0274	540	1,2960	680	0,0021
420	0,2616	560	1,1972	700	0,0005
440	0,7339	580	0,8477	720	0,0001
460	0,7792	600	0,4158	740	0,0001
480	0,5672	620	0,1444	760	0,0001
500	0,6181	640	0,0386	780	0,0000

2.22. РАВНОКОНТРАСТНЫЕ СИСТЕМЫ МКО — 1964—1976 гг.

Для точной оценки цветового различия между двумя близкими цветами $Ц_1$ и $Ц_2$ необходимо учитывать разницу в их цветностях и яркостях, т. е. оценивать расстояние между цветами в цветовом пространстве

$$\Delta E = [\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2]^{1/2}, \tag{2.321}$$

где Δ_1, Δ_2, Δ_3 — разности между тремя координатами цветов $Ц_1$ и $Ц_2$ соответственно.

В 1964 г. МКО рекомендована равноконтрастная система основных цветов U^* V^* W^*, предложенная Г. Вишецки (США) [101—105], в которой координаты цвета

$$U^* = 13W^*(u - u_0);\ V^* = 13W^*(v - v_0);\ W^* = 25Y^{1/3} - 17,$$
$$1 \leqslant Y \leqslant 100, \tag{2.322}$$

где W^* — светлота (индекс яркости), U^* и V^* координаты цветности (*индексы цветности*).

Координаты цветности

$$u = 4X/A;\ v = 6Y/A;\ A = X + 15Y + 3Z;\ u_0 = 4X_0/B;$$
$$v_0 = 6Y_0/B;\ B = X_0 + 15Y_0 + 3Z_0, \tag{2.323}$$

где X_0, Y_0, Z_0 — координаты опорного цвета D_{65} (или белого A), причем $Y_0 = 100$.

В этой системе

$$\Delta_1 = \Delta U^*;\ \Delta_2 = \Delta V^*;\ \Delta_3 = \Delta W^*. \tag{2.324}$$

Если цвета $Ц_1$ и $Ц_2$ имеют координаты соответственно U_1^*, V_1^*, W_1^* и U_2^*, V_2^*, W_2^*, то $\Delta U^* = U_2^* - U_1^*$; $\Delta V^* = V_2^* - V_1^*$; $\Delta W^* = W_2^* - W_1^*$. Если умножить ΔE, полученную из (2.321) на 3, получим ΔE в MPCD.

В 1973 г. МКО рекомендована система основных цветов $L^*u^*v^*$, в которой координаты цвета

$$L^* = 25(100/Y_0)^{1/3} - 16;\ 1 \leqslant Y_0 \leqslant 100;$$
$$u^* = 13L^*(u' - u_0');\ v^* = 13L^*(v' - v_0'), \tag{2.325}$$

а координаты цветности

$$u' = 4X/A;\ v' = 9Y/A;\ A = X + 15Y + 3Z;$$
$$u_0' = 4X_0/B;\ v_0' = 9Y_0/B;\ B = X_0 + 15Y_0 + 3Z_0, \tag{2.326}$$

где X_0, Y_0, Z_0 координаты цвета D_{65} (или белого A). При этом

$$\Delta_1 = \Delta L^*;\ \Delta_2 = \Delta u^*;\ \Delta_3 = \Delta v^*, \tag{2.327}$$

В 1976 г. МКО рекомендована система основных цветов L* a*b* (иногда обозначается LAB; CIE LAB, ANLAB — 40; AN — 40; ANS; LUV), в которой координату цвета L^* берут из (2.325), а координаты цветности:

$$a^* = 500\,[(X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3}];\ b^* = 200\,[(Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}],$$

$$b^* = 200\,[(Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}], \qquad (2.328)$$

причем $Y_0 = 100$ и

$$\Delta_1 = \Delta L^*;\ \Delta_2 = \Delta a^*;\ \Delta_3 = \Delta b^*. \qquad (2.329)$$

Пример. Даны цвета $Ц_1$ (Y 60,45; x — 0,415; y 0,437; u = 0,2239; v — 0,3537) и $Ц_2$ (Y = 61,79; x — 0,41; y = 0,445; u = 0,2181; v — 0,3551). В качестве опорного цвета берем источник C (x = 0,31; y 0,316; u_0 0,2009; v_0 = 0,3072). По (2.322) находим для $Ц_1$: U_1^* = 24,06; V_1^* 48,62; W_1^* = 80,42; для $Ц_2$: U_2^* = 18.15; V_2^* = 50,52; W_2^* = 81,21. Получим ΔU^* = 5,91; ΔV^* = = — 1,9; ΔW^* · — 0,72. Отсюда ΔE — $\sqrt{39.4}$ = 6.2 или ΔE — 3·6,2 = 18,6 MPCD.

Отметим, что наиболее распространенной продолжает быть система UVW МКО-1960 г. благодаря ее простоте и достаточно высокой точности.

2.23. СВЕТОФИЛЬТРЫ И КРАСИТЕЛИ И ИХ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Абсорбционные светофильтры — это пропускающая свет пластинка (среда), поглощающая часть мощности светового потока во всем видимом спектре или в отдельных его частях. Такие светофильтры изготавливают из стекла, желатина или прозрачной пластмассы, а иногда в виде раствора красителя в сосуде с плоскопараллельными стенками.

Для поглощения части видимого спектра светофильтры окрашивают красителями (красители — растворимые вещества, пигменты — нерастворимые частички вещества, диспергированные в красках, лаках, пластмассе). В стеклянных фильтрах вещество красителя равномерно распределено по объему. В качестве красителей применяют окислы металлов и редкоземельных элементов, металлонды, металлы, сурьма и сульфиды. Желатиновые и целлофановые пленки окрашивают анилиновыми красителями.

Законы Бугера и Бира. Поглощение монохроматического излучения, создаваемое фильтром, определяется толщиной пластинки и концентрацией красителя и описывается законами Бугера и Бира. *Закон Бугера* (1729 г.) определяет зависимость между длиной пути светового потока в светофильтре t и *спектральным коэффициентом пропускания* фильтра:

$$\tau_\lambda = \exp(-kt) = \tau_{o\lambda}^t, \qquad (2.330)$$

где k — показатель ослабления (размерность $м^{-1}$); $\tau_{0\lambda}$ — *спектральный коэффициент пропускания фильтра* при $t = 1$ ($\tau_{0\lambda} < 1$; $\lg \tau_{0\lambda} < 0$, $e = 2{,}718$).

Пример. Если один слой фильтра имеет спектральный коэффициент пропускания $\tau_{0\lambda} = 0{,}1$, то три таких слоя создают $\tau_\lambda = 0{,}1^3 = 0{,}001$.

Закон Бира определяет зависимость между концентрацией C красителя (г/см³) и его спектральным коэффициентом пропускания

$$\tau_\lambda = a^{-C} = \tau_{k\lambda}^{C}, \qquad (2.331)$$

где a — константа ($a > 1$); $\tau_{k\lambda}$ — спектральный коэффициент пропускания фильтра при $C = 1$ г/см³ ($\tau_{k\lambda} < 1$).

Формулы (2.330) и (2.331) можно объединить в виде *закона Бугера-Бира*:

$$\tau_\lambda = 10^{-m_\lambda tC}, \qquad (2.332)$$

где m_λ — спектральный показатель поглощения.

Цветность сложного излучения, содержащего спектр, при прохождении через фильтр изменяется в зависимости от длины пути светового потока в нем и концентрации красителя. С их увеличением возрастает чистота цвета, но его яркость уменьшается. На рис. 2.65 показано, как изменяется τ_λ при увеличении пути светового потока в 4 раза. В результате такого увеличения цветность потока на выходе фильтра изменилась с красновато-пурпурной на синевато-пурпурную.

Если фильтр составить из нескольких пластинок одинакового материала с длиной путей светового потока в каждой из них t_1, t_2, ..., t_n, то, подставив в (2.330) $t = t_1 + t_2 + \ldots + t_n$, получим

$$\tau_\lambda = \tau_{0\lambda}^{t} = \tau_{0\lambda}^{t_1} \tau_{0\lambda}^{t_2} \ldots \tau_{0\lambda}^{t_n}. \qquad (2.333)$$

Таким образом, при применении нескольких фильтров, установленных последовательно на пути светового потока, результирующий спектральный коэффициент пропускания τ_λ равен произведению спектральных коэффициентов пропускания отдельных фильтров:

$$\tau_\lambda = \tau_{1\lambda}\, \tau_{2\lambda} \ldots \tau_{n\lambda}. \qquad (2.334)$$

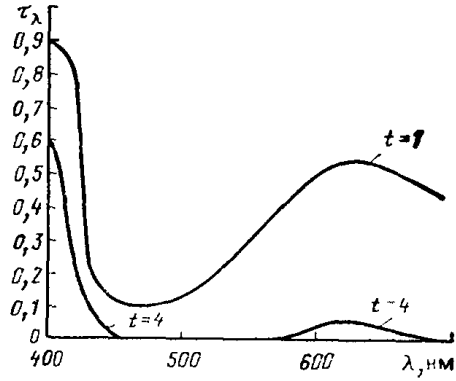


Рис. 2.65. Характеристика спектрального коэффициента пропускания светофильтра при $t = 1$ и 4 относительным единицам

Оптическая плотность. Вместо коэффициента пропускания τ удобно пользоваться *оптической плотностью фильтра* из (1.17):

$$D = \lg (1/\tau) = -\lg \tau;\ 10^D = 1/\tau. \qquad (2.335)$$

Из данных табл. 1.4 для $D > 1$ берем значение τ для дробной части D и делим его на 10^k, где k — целая часть D.

Пример. Дано: $D = 2.40$, находим для D 0,40 $\tau = 0{,}3981$; так как k 2. то для D 2.40 получим $\tau = 0{,}003981$.

Ощущение яркостн светового потока лучше коррелнруется со значеннями плотностей D, чем коэффицнента т, так как завнсимость чувствительностн зрения от изменения яркостн — логарнфмическая. При нспользовании нескольких фильтров, установленных последовательно на пути светового потока, их плотности складываются:

$$D = D_1 + D_2 + \ldots + D_n. \qquad (2.336)$$

Из (2.332) и (2.335) получим

$$D = -\lg \tau_\lambda = m_\lambda t C, \qquad (2.337)$$

т. е. D прямо пропорциональна m_λ, t и C. Например, прн удвоенни C или t плотность D тоже удванвается.

Обычно изготовляют длинноволновые и полосовые светофнльтры. Длнннволновые фильтры (красные н желтые) пропускают волны, длиннее некоторой волны λ_1. Полосовые фнльтры пропускают только часть спектра в пределах $\lambda_1 \ldots \lambda_2$. Светофнльтры делятся по назначенню на три группы: нейтральные, разделительные, коррекцнонные.

Нейтральные фильтры применяют для ослабления светового потока без нзменения его спектрального состава, для чего должно быть $\tau_\lambda = \text{const}$ во всем виднмом спектре. *Разделительные фильтры* применяют для устранения части спектра путем ее поглощения нлн отраженнн. Разделительные интерференцнонные светофнльтры, отражающие часть спектра, действуют по принцнпу интерференцни света и будут рассмотрены ниже. *Коррекционные фильтры* служат для коррекцин спектра излучения илн спектральной характернстнки прнемннка излученнн. Они должны нметь спектральный коэффицнент пропусканнн:

$$\tau_{k\lambda} = k_1 S'_\lambda / S_\lambda, \qquad (2.338)$$

где k_1 — постоянный коэффициент; S'_λ и S_λ — необходнмая н реальная спектральные чувствнтельностн прнемннка нзлученнн.

Интерференционные светофильтры. В ряде оптическнх устройств прнменяют нитерференцнонные светофнльтры, представляющне собой *дихроические зеркала*, которые пропускают энергню одной частн спектра, отражают энергню другой и нмеют малое поглощенне. Достнгается это благодаря интерференцни света.

Дихронческое зеркало выполняют в виде стеклянной плоскопараллельной пластннки (или многослойного покрытия на гранн призмы), на которую наносят 7 ... 20 слоев (тонких пленок) матерналов, имеющих разные коэффицненты преломления света n. Толщнна каждого слоя равна части длнны волны света. На граннце слоев с разнымн n часть падающего света отражается, а часть — преломляется и проходит че-

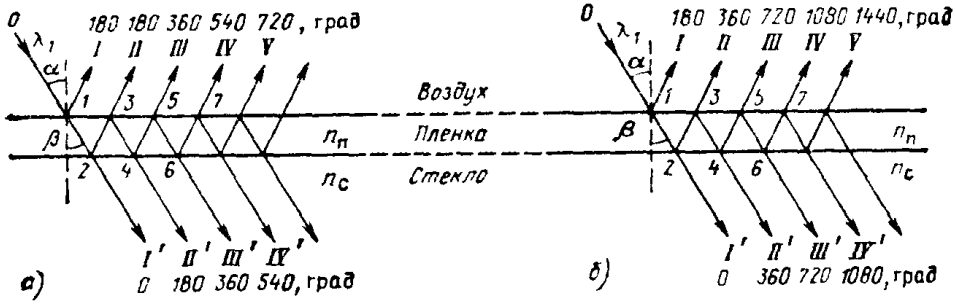


Рис. 2.66. К пояснению действия дихронческого зеркала

рез слой. Толщина слоев выбирается так, что отраженные лучи на одних длинах волн складываются, а на других — уничтожаются.

На рис. 2.66, *а,б* показаны два случая падения света на тонкую пленку толщиной d, наложенную на стекло. В первом случае (рис. 2.66, *а*) коэффициент преломления света в пленке больше, чем коэффициент преломления света в стекле $n_п > n_с$, во втором (рис. 2.66, *б*) — наоборот, $n_с > n_п$. Как известно, при отражении света от более плотной оптической среды фаза волны меняется на 180°. Для рис. 2.66, *а* отраженный луч *I* имеет сдвиг фазы 180° по отношению к падающему лучу, имеющему длину волны λ_1. Значения $n_п$ и d подбирают так, чтобы на участке *1—2 — 3* разность хода $\Delta = \lambda_1/2$, так что луч II будет иметь фазу 180°. Такая же разность хода Δ будет и на участках *3—4—5*, *5—6—7* и т.д., и луч *III* будет иметь фазу 360°, луч *IV* — 540° и т. д. В итоге лучи *I* и *II* сложатся, а *III* и *IV* и т.д. взаимно уничтожатся.

Если фазу прошедшего луча *I'* считать равной нулю, фазы лучей *II'*, *III'* будут 180°, 360° соответственно и т. д., так как на участках *2 — 3 — 4*, *4 — 5 — 6* и т.д. $\Delta = \lambda_1/2$. Поэтому лучи *I'*, *II'*, *III'* и т. д. будут взаимно уничтожаться, т. е. в этом случае пленка будет отражать, а не пропускать световой луч с волной λ_1.

Для зеркала на рис. 2.66, *б* отраженный луч *I* будет сдвинут по фазе на 180° по отношению к падающему, имеющему длину волны λ_1, но при отражении в точках *2*, *4*, *6* они будут менять фазу на 180°, так как $n_с > n_п$. Значения $n_п$ и d выбирают так, чтобы на участках *1 — — 2 — 3*, *3 — 4 — 5*, *5 — 6 — 7* и т. д. $\Delta = \lambda_1/2$. Поэтому лучи *II*, *III*, *IV* будут иметь разность фаз 360°. Таким образом, лучи *I* и *II* взаимно уничтожаются, а лучи *III*, *IV* и т. д. складываются, но содержащаяся в них энергия будет мала. Если фазу прошедшего луча *I* считать равной нулю, то разности фаз лучей *II*, *III* и т. д. будут равны 360° и все прошедшие лучи будут складываться, т. е. пленка будет пропускать, а не отражать световой луч с длиной волны λ_1.

Для увеличения отражения одних волн и пропускания других применяют чередование слоев с большими и малыми коэффициентами преломления. Так как разность хода лучей Δ зависит от угла преломления, а последний зависит от угла падения, то Δ при увеличении угла падения уменьшается и характеристика спектрального пропускания

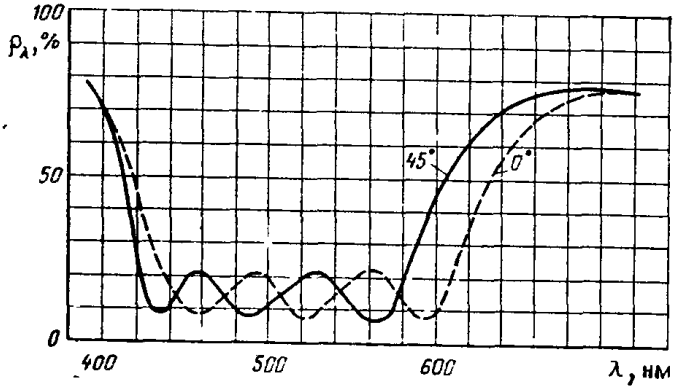


Рис. 2.67. Спектральные характеристики дихроического зеркала $З_1$ при углах падения 0 и 45°

зеркала сдвигается в сторону коротких волн. Этот сдвиг иногда может вызвать нежелательное изменение цветности светового потока, прошедшего через зеркало или отраженного от него.

На рис. 2.67 и 2.68 приведены характеристики спектрального коэффициента отражения ρ_λ двух дихроических зеркал $З_1$ и $З_2$ при углах падения 0 и 45°. Зеркало $З_1$ отражает красные лучи и пропускает зеленые и синие. Зеркало $З_2$ отражает синие лучи и пропускает зеленые и красные. Для них спектральный коэффициент пропускания $\tau_\lambda = 100 - \rho_\lambda$, где ρ_λ и τ_λ измерены в процентах. Потери света в этих зеркалах малы.

Оптимальные светофильтры и красители. Используя (1.16) и (2.256), получаем коэффициенты отражения и пропускания светофильтра соответственно:

$$\rho = \frac{Y_0}{Y_\text{п}} = \frac{\int_0^\infty \bar{y} P_\lambda \rho_\lambda \, d\lambda}{\int_0^\infty \bar{y} P_\lambda \, d\lambda}; \quad \tau = \frac{Y_{0\,\text{пр}}}{Y_\text{п}} = \frac{\int_0^\infty \bar{y} P_\lambda \tau_\lambda \, d\lambda}{\int_0^\infty \bar{y} P_\lambda \, d\lambda}, \tag{2.339}$$

где Y_0, $Y_\text{пр}$, $Y_\text{п}$ — координаты цвета световых потоков, отраженного фильтром, прошедшего сквозь него и падающего на фильтр соответст-

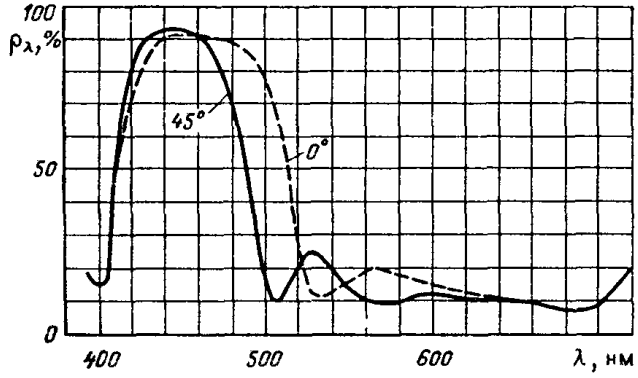


Рис. 2.68. Спектральные характеристики дихронического зеркала $З_2$ при углах падения 0 и 45°

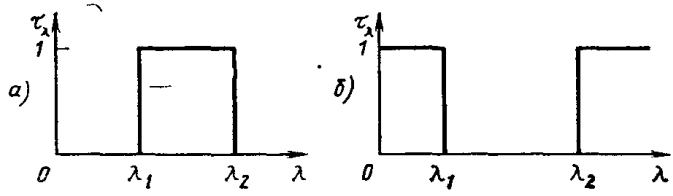


Рис. 2.69. Спектральные характеристнки оптимальных фильтров

венно; P_λ — спектральное распределение мощностн в падающем потоке; ρ_λ и τ_λ — спектральные коэффициенты отражения и пропускания фнльтра соответственно. (Коэффицненты ρ и τ иногда называют светлотой β, под которой в данном случае поннмается отношенне светового потока, отраженного от фильтра или прошедшего через него, к световому потоку, падающему на него.) Для светофнльтров с ндеальными спектральными характеристнками (рис. 2.69) называемых *оптимальными фильтрами* (краснтелямн), спектральная светлота β_λ (т. е. ρ_λ нлн τ_λ) имеет только два значення 0 илн 1, чнсло переходов между

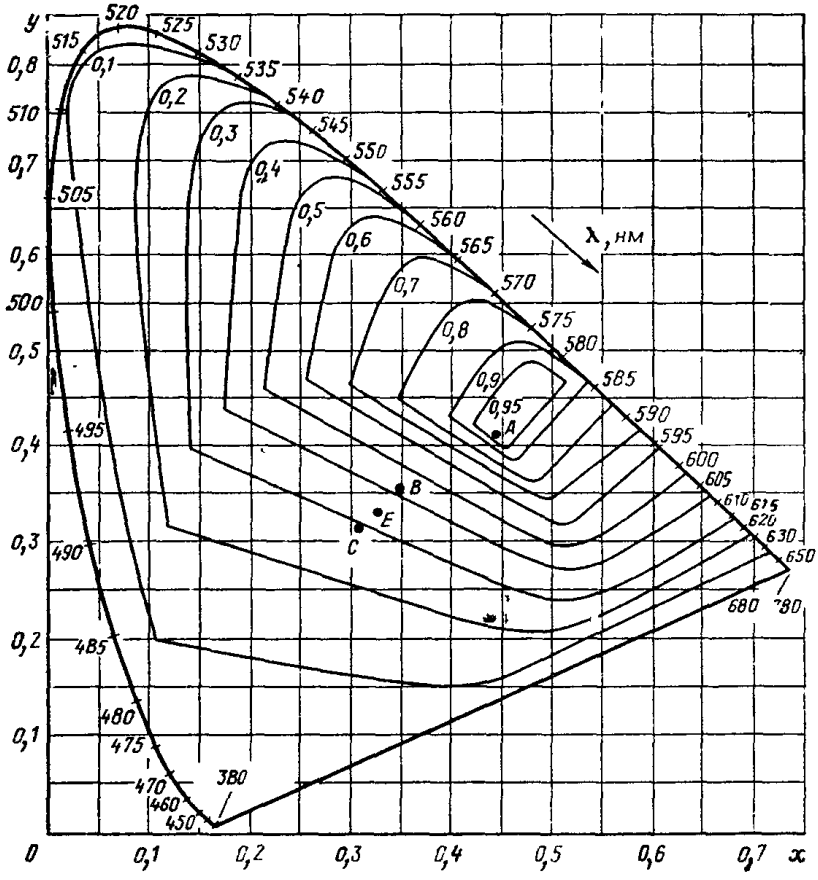


Рис. 2.70. Контуры постояиных значенй максимальной светлоты при освещении источнйком A

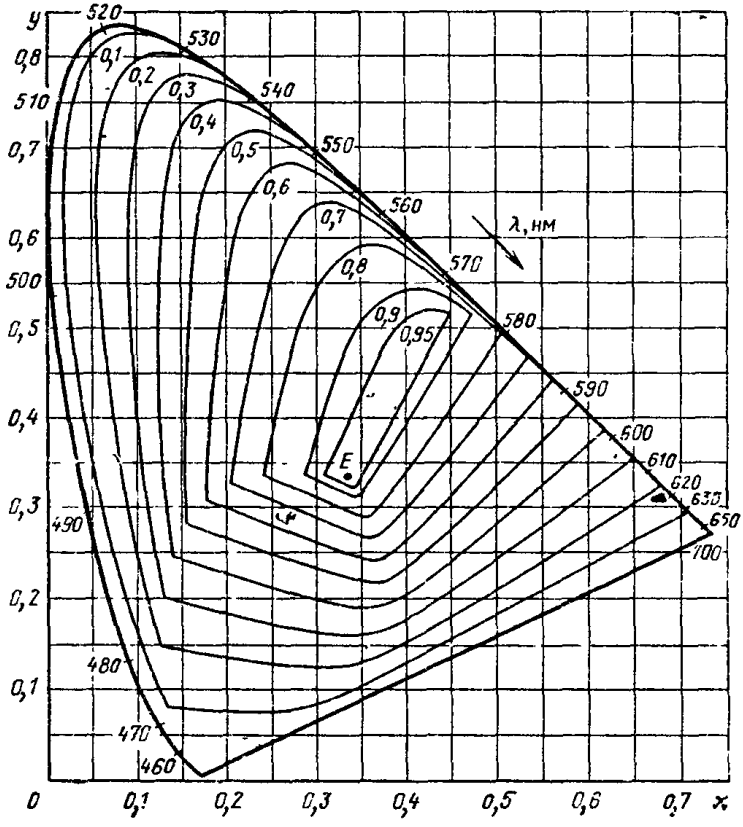


Рис. 2.71. Контуры постоянных значений максимальной светлоты при освещении источником E

которыми не превышает двух. Из (2.339) следует, что при спектральных характеристиках, показанных на рис. 2.69, значение светлоты β является максимальным для данных значений λ_1 и λ_2, т. е. для данной цветности, так как при этом в полосе волн отражения или пропускания $\rho_\lambda = 1$ или $\tau_\lambda = 1$ соответственно и поэтому $\beta = \beta_{макс}$.

Д. Мак-Адам сформулировал теорему [106], согласно которой оптимальные фильтры (красители) создают максимально достижимую насыщенность цвета при заданных значениях λ_1 и λ_2 и соответствующем им значении $\beta_{макс}$. Реальные фильтры (красители) имеют характеристики, отличные от рис. 2.69 и поэтому при данных значениях λ_1 и λ_2, соответствующих $\rho_\lambda = 0$ или $\tau_\lambda = 0$, создают меньшую насыщенность цвета и меньшую светлоту, чем оптимальные.

Для заданного значения $\beta_{макс}$ можно найти координаты цветности, светового потока, исходящего от светофильтра. Точки с этими координатами располагаются на диаграмме цветностей на некотором контуре. Семейства таких контуров, полученных при использовании стандартных источников света A, E и C, даны на рис. 2.70—2.72. При тех же значениях светлоты реальные светофильтры создают меньшую насы-

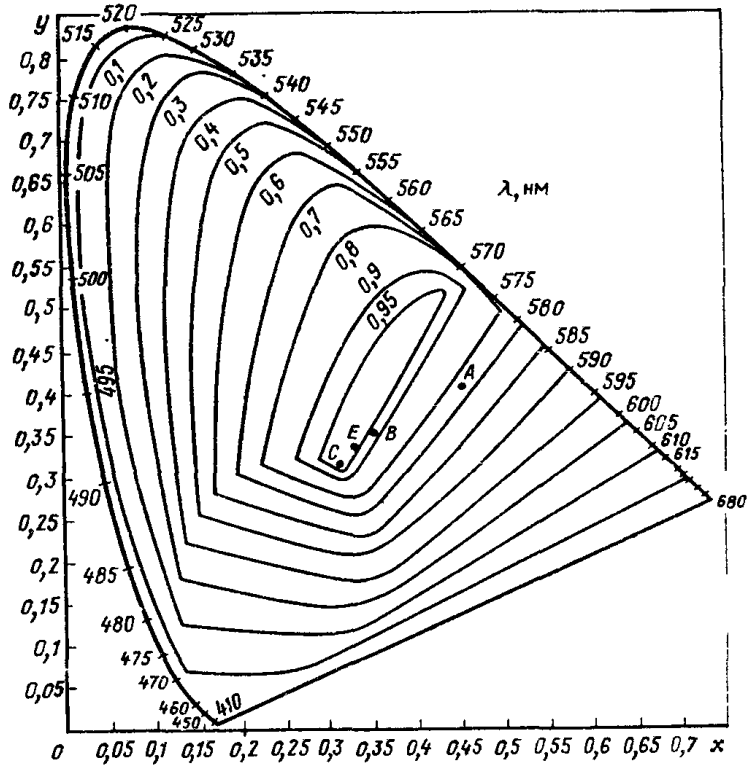


Рис. 2.72. Контуры постоянных значений максимальной светлоты при освещении источником C (теоретнческне крнвые Д. Мак-Адама)

щенность, чем показанная на этнх рнсунках. Из рассмотрения этих крнвых можно сделать следующие выводы: $\beta_{макс} \approx 100$ % независимо от значений чистоты цвета p в области от цветностн нсточника света до желтого спектрального цвета. Для остальных участков диаграммы $\beta_{макс}$ насыщенных цветов имеет малое значенне и поэтому они кажутся темными, особенно синнй, красный и пурпурный цвета. Реальные спектральные характеристнки ρ_λ, блнзкне к оптимальным, получены только для желтых, оранжевых и коротковолновых красных краснтелей, которые часто имеют высокую чнстоту цвета прн большой яркости. Сниие, голубые, зеленые и пурпурные красители прн большой яркости нмеют малую чистоту цвета н очень редко большую насыщенность. Поэтому контуры на рис. 2.70—2.72, соответствующне высокой чнстоте цвета, удалены от областн синих, голубых и пурпурных цветов. В областн этнх цветов острота зрения н его световая чувствнтельность при небольшой нх яркости заметно снижаются. Для каждой точки графнков рис. 2.70—2.72 можно найтн модуль цвета $m_{макс} = Y_{макс}/y$, полагая $Y_{макс} = \beta_{макс}$, н далее определить координаты цвета $X_{макс} = xm_{макс}$ н $Z_{макс} = zm_{макс}$. Кривые на рнс. 2.73, соединяющне точки одинаковых значенний $X_{макс}$, получены из рис. 2.72. На рнс. 2.74 даны аналогнчные крнвые для $Z_{макс}$.

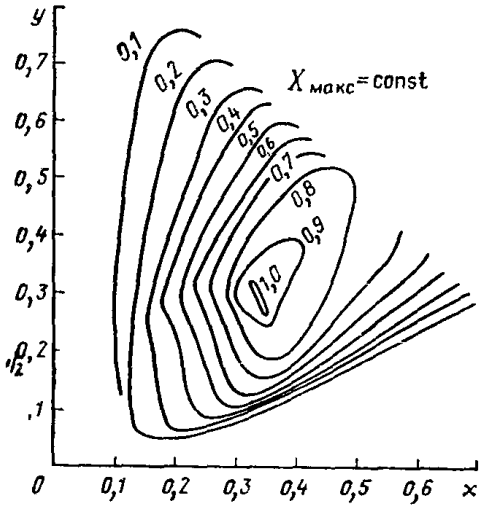


Рис. 2.73. Контуры постоянных значений $X_{макс}$ при освещении стандартным источником C

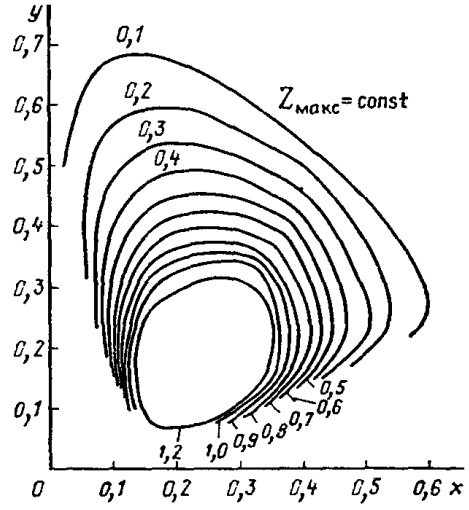


Рис. 2.74. Контуры постоянных значений $Z_{макс}$ при освещении стандартным источником C

Совокупность цветовых векторов в цветовом пространстве для всех оптимальных отражающих (или пропускающих) свет поверхностей с характеристиками рис. 2.69 образует идеальное *цветовое тело* для данного источника освещения. Реальным поверхностям соответствует цветовое тело, находящееся внутри идеального цветового тела. Размещение цветов в *идеальном цветовом* теле должно быть таким, чтобы равные расстояния во всех его точках и направлениях соответствовали равному числу цветовых порогов (т. е. цветовое пространство должно быть равноконтрастным).

2.24. ЦВЕТОВЫЕ АТЛАСЫ

Общие положения. Цветовые атласы [9, 10, 84, 85] составлены для систематизации цветов и введения их обозначений.

Как сказано в § 1.4, наше зрение способно различать до 17 тыс. цветностей и до 10 млн. цветов с учетом отличия их по яркости. Такого количества цветов не имеет ни один атлас. Известен атлас Тэйлора, составленный по системе Оствальда и применяемый для живописи, в котором шкала яркостей построена по логарифмическому закону, что создает ощущение одинаковых (равномерных) изменений яркости между ступенями шкалы. При линейной зависимости коэффициента отражения (рис. 2.75) ступень 1 кажется намного темнее, чем ступень 2, а яркости ступеней 6, 7 и 8 различаются слабо.

В цветовых атласах и словарях обычно имеется 4000 ... 7000 образцов различных цветов, например словарь цветов А. Мэрца и Р. Пауля [84] содержит 7000, а атлас цветов Манселла [85] — 2000 различных

цветов. Образцы в атласе располагаются обычно так, чтобы близкие цвета находились рядом друг с другом и чтобы ощущение разницы между смежными цветами было везде приблизительно одинаковым. В атласе должны быть указаны координаты x, y, u, v по стандартам МКО для всех образцов цветов. При создании атласа очень важно обеспечить неизменность во времени цвета образцов. Один из важных недостатков атласов — зависимость цвета образца от структуры его поверхности и условий освещенности.

В СССР известны Атлас архитектурных цветов, атлас Е. Б. Рабкина и атлас ВНИИМ. Широко применяется атлас цветов Манселла, указанный выше, в котором шкала яркости построена по квадратичному закону. NTSC

Система Манселла. Первое издание атласа, построенного по системе Манселла, было в 1929 г. В 1943 г. система Манселла была откорректирована, получила название *системы ренотации Манселла* и использована в атласе издания 1976 г. Образцы цветов расположены так, что различия в яркости, насыщенности и цветовом тоне везде воспринимаются приблизительно одинаковыми. Яркость цвета (или коэффициент его отражения) называют *интенсивностью цвета* (Value), а насыщенность — *хрома*. Между системой Манселла и системой XYZ МКО — 1931 г. нет аналитической связи, но координаты x, y для образцов цветов атласа известны. В системе Манселла цветовые тона распределены по окружности а образцы цвета помещены рядом друг с другом в том же порядке, что и в спектре, так что взаимно-дополнительные цвета находятся на концах диаметров этой окружности (как в круге Ньютона). Между красным и синим введены образцы пурпурного цвета. В центре цветового круга Манселла (рис. 2.76*) помещен серый цвет. Круг разделен на 10 равных *главных секторов*, обозначенных начальными буквами английских названий цветов — R (красный), YR (желто-красный или оранжевый), Y (желтый), GY (желто-зеленый), G (зеленый), BG (сине-зеленый или голубой), B (синий), PB (синевато-пурпурный), P (пурпурный), RP (красновато-пурпурный). Каждый главный сектор разделен на 10 равных *малых секторов*, пронумерованных от 1 до 10 по часовой стрелке (на рис. 2.76* для простоты только один главный сектор разделен на 10 частей). Насыщенность (хрома) показана как расстояние от центра по радиусу, причем радиус делится на 16 одинаковых частей (однако не во всех случаях имеются образцы цветов, соответствующие шестнадцатому делению).

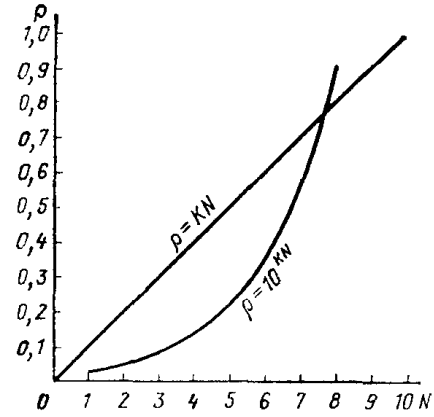


Рис. 2.75. Линейная и логарифмическая зависимости коэффициента отражения ρ от номера ступени N серой шкалы

Круги Манселла располагаются по высоте цилиндра (рис. 2.77*) Вдоль оси цилиндра помещена квадратичная шкала яркостей (интенсивность цвета V), состоящая из 10 делений (черное, при полном поглощении — 0; белое, при полном отражении — 10). Практически используются деления 1 ... 9, так как изготовить образцы цветов с интенсивностью 0 или 10 не удается. Для белого фона интенсивность (светлота) $V = \sqrt{Y}$, где $0 \leqq Y \leqq 100$. Для более точных измерений формулы усложняются. Например, для средне-серого цвета $V = (1{,}47Y - 0{,}00474\ Y^2)^{1/2}$. Таким образом, круги Манселла, помещенные в цилиндре, образуют цветовое тело. Реально средний круг имеет наибольший диаметр, верхний и нижний круги — наименьшие, так как высоконасыщенные цвета всегда имеют среднюю яркость, а очень темные и очень светлые — пониженную насыщенность. В любых точке и направлении в цветовом поле Манселла равные расстояния не соответствуют точно равным ощущениям различия между цветами, что является недостатком этой системы.

Обозначаются цвета в системе Манселла в таком порядке: цветовой тон, интенсивность, хрома. Например, 7GY 5/8 означает цвет с интенсивностью 5, помещенный в малом секторе № 7 главного сектора GY, имеющий хрому 8 (считая от центра круга).

Система Оствальда. В атласе Оствальда (1920 г.) каждый цвет рассматривается как смесь цветов высоконасыщенного с ненасыщенным (белым и черным) и обозначается цифрой и двумя буквами, определяющими соответственно цветовой тон, количество белого и черного. В издании 1948 г. атлас называется «Руководство по цветовой гармонии» и содержит 680 образцов на 12 картах.

Цветовое тело в этой системе представляет собой двойной конус с общим основанием; в северном полюсе помещен белый цвет, в южном — черный. Конусы пересекаются 24 вертикальными плоскостями, образующими 24 сектора (24 цветовых тона).

Цветовая карта DIN, изданная в 1962 г., является немецким стандартом и используется в Европе. По ней каждый цвет определяют цветовым тоном, насыщенностью и относительной светлотой h (степенью темноты, равной $\lg h$), где $h = Y/Y_0$ (Y — коэффициент яркости цвета образца, Y_0 — коэффициент яркости цвета оптимального красителя с такой же цветностью). Содержит 585 образцов.

Атлас Е. Б. Рабкина содержит таблицы, представляющие сечения цветового тела полуплоскостями с общей осью серого. В каждой таблице имеется более 50 образцов цветов, расположенных в равностороннем треугольнике.

2.25. ОБЪЕКТИВНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЦВЕТА

Цвет измеряют [19—23] с помощью *колориметров*, которые делят на субъективные (визуальные) и объективные (фотоэлектрические). С помощью *субъективных колориметров* цвет измеряют визуальным (зрительным) согласованием с цветом, создаваемым в коло-

рнметре смесью трех эталонных цветов (основных цветов колориметра).

В *объективных колориметрах* цвет измеряют с помощью показаний стрелочного прнбора илн цифрового ннднкатора, показывающего значення координат цветностн x, y нлн u, v. Для техинческнх целей обычно прнменяют объективный колориметр с точностью измерений до 0,005 ... 0,01 (по шкале значеннй координат x,y), прнчем прнемником света является один *фотоэлектронный умножитель* ФЭУ со сменными светофильтрами (поочередный отсчет) нлн трн с постояннымн (одновременный отсчет). Обычно прнменяют ФЭУ н светофильтры, создающие вместе характернстикн спектральной чувствнтельности колориметра в виде стандартных кривых удельных координат $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ в снстеме XYZ МКО-1931 г. Крнвые $\bar{y}$ н $\bar{z}$ одногорбые, н каждая обеспечнвается однім светофильтром. Кривая $\bar{x}$ нмеет два горба, н для ее получення применяют два светофнльтра. Точность измерення такнм колориметром определяется точностью выполнення спектральных характернстнк н линейностью процесса преобразования света в снгнал, стабнльностью работы ФЭУ. Иногда так выбнрают основные цвета колориметра, чтобы кривые их удельных координат $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ были одногорбыми. Напрнмер, кривая сложення (2.299) н крнвые $\bar{n} = \bar{y}$, $\bar{p} = \bar{z}$.

2.26. СУБТРАКТИВНОЕ СМЕШЕНИЕ (ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЦВЕТОВ)

Получить данный цвет можно не только сложением световых потоков трех основных цветов, но н вычнтаннем из спектра белого света ряда его спектральных составляющих (субтрактивное, т. е. вычитательное получение цвета). Получаемый цвет, как н прн аддитивном смешенни, определяется цветамн смешиваемых нзлучений, а не нх спектральным составом. Для вычитания применяют — среду с избирательным поглощением света, например слой краски, окрашенная пленка и др.

Краски делят на две группы — прозрачные и рассенвающие. *Прозрачные краски* поглощают одну часть спектра и пропускают другую. *Рассеивающие краски* не пропускают вндмый спектр, но отражают одну его часть и поглощают другую. Если слой прозрачной краскн нанестн на белую подложку, то, отразившись от подложкн, световой луч проходнт вновь через слой краскн н выходнт из него окрашенным в цвет, являющийся дополннтельным к цвету, поглощенному краской. Характернстнка спектрального коэффицнента пропускания регулируется толщиной светофнльтра или измененнем концентрацни молекул краснтеля в нем, как это следует из закона Бугера — Бнра (см. § 2.23). Обычно применяют трн субтрактивных светофильтра для получення широкой гаммы цветов — голубой, желтый и пурпурный. Эти светофильтры пропускают голубой, желтый и пурпурный световые потоки (цвета) соответственно. Каждый из них должен поглощать цвет, допол-

нительный к пропускаемому. Идеализированные характеристики спектрального коэффициента пропускания τ_λ трех основных субтрактивных светофильтров даны на рис. 2.78* (Г, Ж, П — голубой, желтый и пурпурный светофильтры). Два таких светофильтра (рис. 2.79а, помещенные последовательно на пути белого светового потока, имеют результирующие идеализированные характеристики спектрального коэффициента пропускания τ_λ (рис. 2.79*б**). Из рисунка видно, что светофильтры Г и П вместе пропускают только синий цвет *B*, а светофильтры Г и Ж вместе — только зеленый цвет *G*, светофильтры Ж и П вместе — только красный цвет *R*. Следовательно, на выходе этих пар светофильтров получают основные аддитивные цвета *R*, *G*, *B*.

С помощью рис. 2.78* легко объяснить, как получают цвета *R*, *G*, *B* на выходах этих пар светофильтров. Действительно, светофильтр Г пропускает спектр $\lambda_1 - \lambda_3$; светофильтр П пропускает спектры $\lambda_1 - \lambda_2$ и $\lambda_3 - \lambda_4$. Поэтому цвет *R* (спектр $\lambda_3 - \lambda_4$) не пропускается светофильтром Г, цвет *G* (спектр $\lambda_2 - \lambda_3$) не пропускается светофильтром П, цвет *B* (спектр $\lambda_1 - \lambda_2$) пропускается обоими светофильтрами Г и П. Следовательно, пара Г + П вычитает из белого света цвета *R* и *G*. Аналогично можно объяснить действие других пар светофильтров (Г + Ж и Ж + П). Реальные светофильтры имеют более плавные характеристики спектральных коэффициентов пропускания с взаимным перекрытием.

Глава 3
ЦВЕТНОЕ ТЕЛЕВИЗИОННОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

3.1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЦВЕТА В ТЕЛЕВИДЕНИИ. ЦВЕТОВАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЗРЕНИЯ

Основные требования. Качеству воспроизведения цвета в фотографии, кинематографии, цветном телевидении посвящено большое число исследований [25—40; 108—113].

Точно воспроизвести цвета, при которых наблюдатель не ощущает разницы между цветами изображения и оригинала, можно при выполнении следующих условий: а) яркость и цветность воспроизводятся без искажений; б) изображения наблюдаются при тех же условиях, в которых находится оригинал.

В телевидении такие условия обычно не выполняются. Для получения высокого качества воспроизведения изображения следует обеспечивать *линейную зависимость* между яркостями изображения и оригинала, и, кроме того, яркость изображения на белых участках должна быть достаточно большой, чтобы цвета воспринимались с малыми искажениями, например, чтобы не возникал *эффект Пуркинье* (при ма-

лой яркости цвета теряют насыщенность, например, оранжевый и желтый цвета воспринимаются как коричневые) и чтобы разрешающая способность и контрастная чувствительность зрения были высокими. Элементы изображения в телевидении воспроизводятся поочередно, что может привести к мерцаниям (т. е. периодическим изменениям) яркости и цветности. Так как наше зрение чувствительнее к мерцаниям яркости цвета, чем к мерцаниям его цветности, то, чтобы заметность мерцания была такой же, как и для неокрашенных деталей, различно окрашенные мерцающие детали равной яркости могут быть крупнее, чем неокрашенные с разной яркостью (при одинаковой максимальной яркости).

Проф. Н. Д. Нюберг в 1948 г. предложил [24] использовать три понятия точности воспроизведения цвета:

физическая точность, когда спектральные составы излучений оригинала и изображения одинаковы;

физиологическая точность, когда у наблюдателя ощущения цветов оригинала и изображения одинаковы;

психологическая точность, когда изображение оценивает наблюдатель как высококачественное, хотя физиологическая точность не соблюдается.

На практике нет смысла добиваться физической точности воспроизведения, так как важно воспроизвести цветность, а не спектр. К физиологической точности следует стремиться, а психологическая является обязательной.

В цветном телевидении следует пользоваться следующими понятиями (оценками) точности воспроизведения (точности цветопередачи) цвета оригинала (передаваемой сцены) в изображении на экране телевизора:

1) *колориметрическая точность цветности изображения* — для количественной оценки искажений координат цветности x, y системы XYZ МКО-1931 г. (или u, v системы UVW МКО-1960 г.) в изображении относительно оригинала;

2) *психологическое качество* (*психологическая точность*) цветного изображения — для качественной оценки допустимости искажений цвета (т. е. цветности и градаций яркости) изображения относительно оригинала при их визуальном сравнении. Если такое сравнение невозможно, изображение иногда оценивают относительно зрительного образа данного оригинала, возникающего в сознании по памяти в соответствии со смыслом оригинала. Однако в последнем случае цветовая композиция искаженного изображения может значительно отличаться от задуманной режиссером (художником) и оценка этого изображения, сделанная зрителем без учета замысла режиссера, может оказаться ошибочной, не пригодной для использования в технических расчетах при создании аппаратуры и при ее эксплуатации.

При оценивании психологической точности воспроизведения следует учитывать, что восприятие цветности знакомых предметов (кожи лица и рук, волос, воды, неба, листьев и травы, хорошо известных цветов фруктов и овощей, мяса, различных белых поверхностей и др.) имеет

ся более крнтичным, чем восприятне цветности малознакомых предметов. Кроме того, еслн данная цветность имеет важное смысловое значенне, то искаженя ее не должны быть значительнымн. Замечено, что нскажения насыщенности цвета могут быть больше, чем нскаженя цветового тона. При воспроизведенин нзображения следует учитывать влнянне цветовой адаптацин на воспрнятие цвета. Напрнмер, поверхность с одинаковым по спектру коэффнциентом отражения воспрнннмают как белую, еслн спектральный состав нсточннка света изменяется так, что увелнчивается ннтенснвность его нзлучення в синей нлн желтой областн. Цветовая адаптацня зренння наблюдателя в студни телецентра завнснт от средней освещенностн сцены, которая обычно изменяется в процессе наблюденя, а цветовая адаптацня зренння телезрнтеля завнснт от условнн освещення помещения, которые обычно остаются постояннымн.

Для получення хорошего цветового восприятня необходнмо, чтобы при воспронзведеннн нзображення поверхностей с однпаковым спектральным коэффнцнентом отражения по всему вндпмому спектру (например, снег, белая бумага, белая матерня н т. д.) наблюдатель воспринимал их нзображення как белые, независнмо от спектрального состава нзлучення нсточннка света, освещающего орнгннал. Для достнженя этого обычно выбнрают некоторую малонасыщенную *контрольную* (*опорную*) *цветность* $Ц_к$ н добнваются ее воспронзведения без нскаженнй. Выбирают $Ц_к$ с учетом требованнй наблюдателей (зрнтелей), окружающего освещення и технпческнх возможностей. В телевнденнн в качестве опорного белого цвета $Ц_к$ выбнрают обычно цветность стандартных нсточнпков света C нлн D_{65} [27—29]. Так как наблюдатель воспрнннмает цвета нанболее благопрнятно прн дневном свете, то для освещення цветных поверхностей в студнн целесообразно прнменять нсточннкн дневного света.

Искаженя отдельных цветностей часто менее заметны, если при этом искажены н другне цветностн, так чтобы между всеми воспронзводнмыми цветностямн имелнсь правнльные нптервалы. Напрнмер, прн освещеннн слегка окрашенным белым светом цвета предметов нзменяются, но заметность этнх измененнй невелика, так как правильные интервалы между цветамн прн этом сохраняются. Изучение творчества велнкнх художнпков показывает, что очень часто цвет, являющийся в орнгинале промежуточным между двумя другнмн, и на картнне является таким же промежуточным.

На воспрнятне цвета в большей мере влияет характер наблюдаемой поверхности — ее размеры н форма, глянцевитость н блескость, матовость, строенне (текстура), вндпмая неоднородность отражения света от точек поверхностн (завнсящая от физическнх свойств поверхности *фактура*). Разлнчне этнх параметров иногда не позволяет согласовать нх цвета. Прн использованнн фотохимических (в фотографии) н электронных (в телевиденнн) преобразователей света в изображение следует учнтывать, что восприятие цвета оригинала зависит от условий адаптацни зренння н ряда других субъектнвных явлений (например, одно-

временный контраст цветов), а средства, осуществляющне это преобразованне (фотоэмульсня, передающая телевнзионная камера н кннескоп прнемника), реагнруют только на количество энергнн н свободны от этих явленнй.

Прн построеннн аппаратуры цветного телевндения стремятся обеспечнть *колориметрическую точность цветопередачи*. Изображенне счнтается колориметрнческн точным, если координаты цветности всех его участков $x_и$, $y_и$ равны координатам цветностн соответствующих участков орнгннала x_0, y_0 прн нзмеренин объектнвным колорнметром. Этот метод оценнвання качества цветовоспронзведення позволяет делать колорнметрическне расчеты аппаратуры н получать количественные оценкн колорнметрнческнх ошибок цветопередачн. Прннято счнтать что этн ошнбки (разность между координатамн цветностн x_0 и $x_и$, y_0 н $y_и$) не должны превышать нескольknх среднх цветовых порогов (СЦП).

Прн одновременном наблюденнн нзображення и орнгннала в одинаковых условнях следует стремнться к полученню высокой колорнметрнческой точностн цветопередачн. Однако зрнтель часто не вндит орнгннала, а оценнвает качество цветопередачн сравненнем цветов друг с другом, с цветамн предметов, находящихся в комнате, с цветом, сохраннвшнмся в памятн. Это может прнвестн к тому, что колорнметрнческн точные цвета нзображення будут оценены зрнтелем менее благопрнятно, чем прн наблюденнн нзображення, содержащего колориметрнческие ошнбкн. По-виднмому, для хорошего цветовоспронзведення колорнметрнческн правнльная цветопередача не обязательна, еслн можно создать более благопрнятное воспрнятне цветов (пснхологнческая точность) относнтельно опорного белого цвета. Для достнжения этого необходнмо иметь данные о том, как влняет цветовая адаптация на воспрнятне цветностн [86].

Чувствительность зрения к изменениям цветового тона. Первые исследования по этому вопросу проводнлнсь русскими ученымн Н.Мандельштамом н В. Добровольскнм в 1867—1972 гг. По кривым рнс. 3.1* вндно, что нанболее заметны различня цветового тона в диапазоне волн 480 ... 640 нм (ог голубых до красных цветов), особенно на волнах 500 н 600 нм (голубовато-зеленый н оранжевый цвета), на которых глаз разлнчает нзменення преобладающей длнны волны прнблнзительно на 1 нм. Прн уменьшенни насыщенностн чнсло разлнчнмых глазом цветовых тонов снижается. Прн малой нлн слншком большой яркостн эффект аналогичен. В нормальных условнях зренне может разлнчать 150 спектральных н 30 высоконасыщенных пурпурных цветов.

Чувствительность зрения к изменениям насыщенности цвета. По данным С. В. Кравкова (1926 г.), чувствнтельность зрения к нзменениям чнстоты цвета больше для снльно насыщенных н малонасыщенных цветов. Прн средней насыщенностн цветов зрение мало чувствительно к ее нзмененням. Из зависнмости числа разлнчаемых зреннем пороговых измененнй насыщенности от белого до монохроматнческого цвета для разлнчных длнн волн (рис. 3.2) вндно, что чувствнтельность к нзмене-

ниям насыщенности желтого цвета является наименьшей (4 MPCD), для синего и красного цветов — наибольшей (25 MPCD).

Обнаружено, что если, не изменяя чистоты цвета, изменять его цветовой тон, то чистота цвета может казаться различной. А если при неизменной преобладающей длине волны λ_d изменять чистоту цвета, то цветовой тон может казаться изменяющимся.

Оценка верности цветовоспроизведения. В цветном телевидении для оценки верности воспроизведения цвета на экране приемного устройства различие цветов ΔE изображения и оригинала можно определить, пользуясь формулой, аналогичной (2.321):

$$\Delta E = [(U^*_{\text{о}} - U^*_{\text{и}})^2 + (V^*_{\text{о}} - V^*_{\text{и}})^2 + (W^*_{\text{о}} - W^*_{\text{и}})]^{1/2}, \qquad (3.1)$$

где индекс «0» означает оригинал (передаваемую сцену), индекс «и» — изображение.

Измеряют ΔE в тех же единицах, что индексы цветности U^*, V^*, W^*.

Индексы цветности оригинала и изображения определяют по формулам, аналогичным (2.322):

$$\begin{aligned} W^*_{\text{о}} &= 25Y^{1}_{\text{о}} - 17; & W^*_{\text{и}} &= 25Y^{1/3}_{\text{и}} - 17; \\ U^*_{\text{о}} &= 13W^*(u_{\text{о}} - u_D); & U^*_{\text{и}} &= 13W^*_{\text{и}}(u_{\text{и}} - u_{\text{рс}}), \\ V^*_{\text{о}} &= 13W^*_{\text{о}}(v_{\text{о}} - v_D); & V_{\text{и}} &= 13W^*_{\text{и}}(v_{\text{и}} - v_{\text{рс}}) \end{aligned} \qquad (3.2)$$

где $u_{\text{о}}$, $u_{\text{и}}$; $v_{\text{о}}$, $v_{\text{и}}$ — координаты цветности оригинала и изображения в равноконтрастной системе МКО — 1960 г.; $u_{\text{рс}}$ и $v_{\text{рс}}$ — координаты цветности опорного равностимульного белого цвета приемника (обычно белое D_{65}, для которого $u_{\text{рс}} = 0{,}198$; $v_{\text{рс}} = 0{,}312$); v_D и v_D — координаты цветности источника освещения оригинала (обычно это тоже белый цвет D_{65}).

Если $W^*_0 \quad W^*_u \quad 61$, где 61 — значение средней светлоты испытательных (эталонных) цветов в относительных единицах, применяемых для оценки верности воспроизведения цвета, то различие цветов определяют по формуле Н. Майера (ФРГ, 1972 г.):

$$\Delta E' = 800 \sqrt{[(u_{\text{о}} - u_D) - (u_{\text{и}} - u_{\text{рс}})]^2 + [(v_{\text{о}} - v_D) - (v_{\text{и}} - v_{\text{рс}})]^2} \quad ; \qquad (3.3)$$

Единица $\Delta E'$ в 3 раза меньше отрезка 0,0038 на диаграмме цветностей u, v МКО — 1960 г. Если умножить правую часть (3.3) на 3, то $\Delta E'$ будет равно числу MPCD между цветностями изображения и оригинала. Отметим, что (3.3) учитывает адаптацию зрения к источнику света с координатами цветности $u_{\text{рс}}$, $v_{\text{рс}}$.

Для цветного телевидения известна система оценки качества цветовоспроизведения с помощью *индекса цветопередачи* ИЦП, для чего предложены восемь *эталонных испытательных цветов* ЭИЦ с номерами 1 ... 8, а также 6 ЭИЦ с номерами 9 ... 14, необходимых для более полной оценки. Для каждого из этих цветов введен *«специальный» ИЦП*

$$R_i \quad 100 \quad 4{,}6\Delta E', \qquad (3.4)$$

где $\Delta E'$ из (3.3). Слагаемое 100 введено здесь, чтобы иметь $R_i = 100$ при отсутствии искажений, когда $\Delta E' = 0$. Также предложен *«средний» ИЦП для 8 ЭИП*

$$R_a = 100 - (4{,}6/8) \sum_{i=1}^{\infty} \Delta E'_i. \qquad (3.5)$$

Таблица 3.1

R_a	Оценка
80...100	Отлично
65...80	Очень хорошо
50...65	Хорошо
30...50	Удовлетворительно

В табл. 3.1 даны субъективные оценки качества цветопередачи, соответствующие различным значениям R_a, полученные на основании имеющегося опыта.

Заметим, что современная студийная аппаратура позволяет получить на мониторе (видеоконтрольном устройстве ВКУ) в студии (без кодирования сигнала) $R_a \geqslant 80$.

3.2. ВОСПРИЯТИЕ ЦВЕТНОСТИ ПРЕДМЕТОВ МАЛЫХ УГЛОВЫХ РАЗМЕРОВ

Этот вопрос частично рассматривался в § 1.4 [78—80]. Было обнаружено, что все спектральные цвета могут быть согласованы только двумя (а не тремя!) основными цветами, если поле зрения составляет 10 ... 25′ (угловые минуты). Эти основные цвета — спектральный красный (650 нм) и синий (460 нм). Для этих условий были получены две кривые смешения r и b вместо обычных трех r, g, b (единичные количества основных цветов были взяты на волне 582,5 нм). На волнах 410 нм (фиолетовый цвет) и 578 нм (желтый цвет) глаз не различает цвета, а видит малый предмет серым (нейтральным) с цветовой температурой, близкой к 4800К. Если на диаграмме цветностей две точки, соответствующие этим волнам, соединить прямой, получим линию, аналогичную линиям одинаковой цветности для *тританопа* (изоцвета) (рис. 3.3). Лучше всего цветовой тон различается в области оранжевых и близких к ним красных цветов, где один средний цветовой порог (10 MPCD) равен около 7 нм, тогда как в других областях он доходит до 48 нм. Было также обнаружено, что по мере уменьшения угловых размеров предметов их цвета воспринимаются как цвета смеси оранжевого и голубого цветов, как показано на рис. 3.4 Здесь направление стрелок совпадает с изоцветными прямыми тританопа, показанными на рис. 3.3.

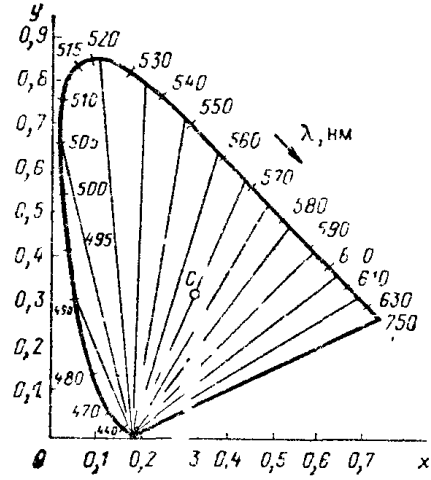
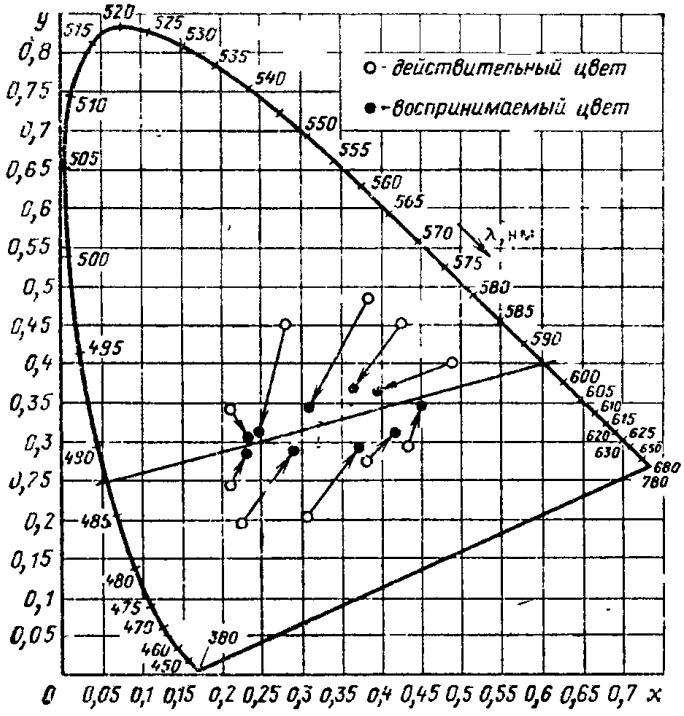
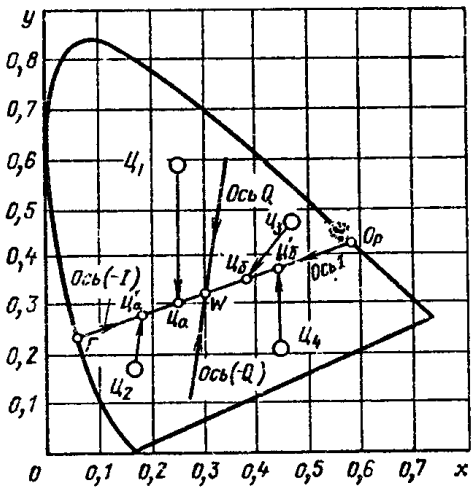


Рис. 3.3. Линии одинаковых цветов для тританопа, (изоцвета), построенные Д. Джадом



Рнс. 3 4. К пояснению субъектнвного восприятня цвета малых предметов

Явление тритаиопного воспрнятня цветов нормальным зреннем прн размере предмета 20′ поясняется схематическн на рнс. 3.5, где на днаграмме цветностей показаны четыре цвета $Ц_1$, $Ц_2$, $Ц_3$, $Ц_4$ предметов крупных размеров. Прн уменьшенин размеров предметов цвета $Ц_1$ и $Ц_2$ превращаются в цвета $Ц_а$ и $Ц'_а$, а цвета $Ц_3$ и $Ц_4$ — в цвета $Ц_б$ н $Ц'_б$, где цвета $Ц_а$, $Ц'_а$, $Ц_б$, $Ц'_б$ представляют собой смесн оранжевого н голубого цветов. Прн дальнейшем уменьшеннн размеров предметов ощущенне цвета теряется и предметы кажутся нам серымн (точка W). Направленне $O_рГ$ на этом рнсунке получнло в цветном телевндении название осн I, а направленне, по которому цветностн прнблнжаются к оси I называют осью Q.



Рнс. 3.5. Цветностн крупных, средних н мелких предметов, воспрнннмаемые глазом

Таким образом, по мере уменьшения угловых размеров предметов нх цвета изменяются вначале по оси Q, приблнжаясь к оси I. Затем вдоль оси I, приблнжаясь к точке W.

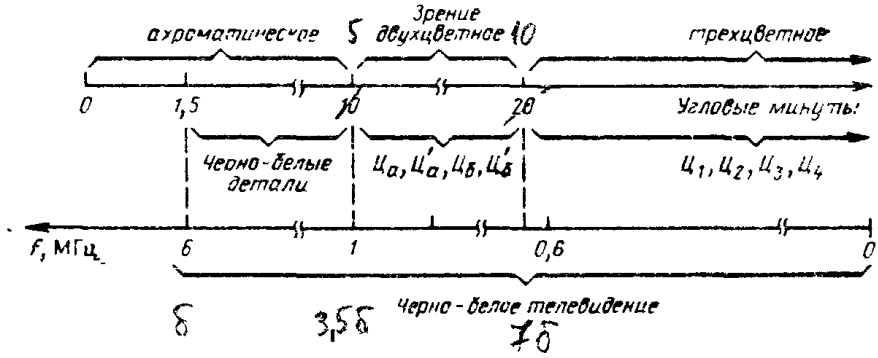


Рис. 3.6. Связь между размерами предметов и полосой частот видеосигнала при развертке на 625 строк (25 кадр/с, чересстрочная развертка)

Для цветного телевидения это явление оказалось чрезвычайно важным. Оно означает, что для предметов с размерами 1,5 ... 5′ зрение ахроматично. Изображение предметов с такими размерами может быть черно-белым и ему должен соответствовать видеосигнал с полосой частот 6 МГц (при 625 строках и телевизионном стандарте СССР). Для предметов размерами 5 ... 10′ зрение двухцветно (дихроматично), и мы ощущаем цвета лежащие только на оси *I*. Для передачи этих цветов (рис. 3.5, цвета $Ц_а$ и $Ц_б$) видеосигнал должен иметь полосу частот 1 ... ... 1,5 МГц. Для предметов с размером более 10 ... 20′ наше зрение трехцветно (см. рис. 3.5, цвета $Ц_1$, $Ц_2$, $Ц_3$, $Ц_4$), и для их передачи нужна полоса частот до 0,6 ... 1 МГц. Сказанное поясняется на рис. 3.6 (изображение предметов размерами 0 ... 1,5′ в телевидении на 625 строк не воспроизводится).

3.3. УСЛОВИЯ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИ ПРАВИЛЬНОЙ ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ

Вопросам колориметрии изображения в цветном телевидении посвящена обширная литература [41—49; 114—120]. Приемное устройство цветного телевидения (телевизор или ВКУ) имеет три источника света, создающих основные цвета приемника — красный $R_п$, зеленый $G_п$ и синий $B_п$, которые складываются аддитивно для создания цветного изображения. Эти цвета получают пропусканием белого света через светофильтры или применением люминофоров, светящихся под действием электронных лучей с соответствующими цветами $R_и$, $G_и$, $B_и$. Яркость каждого основного цвета должна изменяться так, чтобы пропорции основных цветов в смеси могли изменяться в широких пределах для получения широкой гаммы цветов.

На диаграмме цветностей основные цвета образуют цветовой треугольник приемника $R_п G_п B_п$. Очевидно, что приемник может создавать только цветности, представленные точками внутри этого треугольника. Воспроизвести цвета, лежащие вне этого треугольника невозможно,

цвета оригинала, лежащие за его пределами, будут воспроизводиться с искажениями насыщенности и цветового тона.

Для колориметрически правильного воспроизведения цвета оригинала, представленного точкой на диаграмме цветностей внутри цветового треугольника $R_пG_пB_п$, необходимо, чтобы основные цвета приемника имели правильные *относительные количества* (пропорции в смеси), а для создания ими правильной яркости изображения имели необходимые *абсолютные количества* (яркости).

Для колориметрически правильного воспроизведения в изображении цветности каждого элемента оригинала должно выполняться следующее условие для координат цветности оригинала x_0, y_0, z_0 и изображения $x_и$, $y_и$, $z_и$ в системе XYZ МКО — 1931 г.:

$$x_и = x_0;\ y_и = y_0;\ z_и = z_0. \tag{3.6}$$

Аналогичное условие можно написать для координат цветности u, v в системе UVW МКО — 1960 г.

Для выполнения (3.6) необходимо обеспечить, во-первых, линейную зависимость между координатами цвета изображения и оригинала:

$$X_и = k_1 X_0;\ Y_и = k_2 Y_0;\ Z_и = k_3 Z_0, \tag{3.7}$$

где k_1, k_2, k_3 — постоянные коэффициенты; тогда получим из (3.6) и (3.7)

$$x_и = Y_и/m_и = k_1 X_0/m_и;\ y_и = Y_и/m_и = k_2 Y_0/m_и, \tag{3.8}$$
$$z_и = Z_и/m_и = k_3 Z_0/m_и;\ m_и = X_и + Y_и + Z_и = k_1 X_0 + k_2 Y_0 + k_3 Z_0,$$

во-вторых, равенство коэффициентов

$$k_1 = k_2 = k_3 = k. \tag{3.9}$$

Подставив (3.9) в (3.8), получим $m_и = km_0$, откуда следует $x_и = x_0$; $y_и = y_0$; $z_и = z_0$, т. е. (3.6) выполняется. Таким образом, при выполнении (3.7) и (3.9) цветности передаваемой сцены и ее изображения колориметрически тождественны. Яркости оригинала и изображения в абсолютных или относительных единицах соответственно

$$L_0 = Y_0;\ L_и = Y_и. \tag{3.10}$$

Таким образом, подставив (3.10) в (3.7) с учетом (3.9), получим

$$L_и = kL_0. \tag{3.11}$$

Зависимость между $L_и$ и L_0 обычно выражается следующим образом:

$$L_и = CL_0^{\Gamma}, \tag{3.12}$$

где C — константа; Γ — градиент передачи яркости.

Функция $\lg L_и = \lg C + \Gamma \lg L_0$ линейна в логарифмическом масштабе. Следовательно, для выполнения (3.11) необходимо, чтобы

$$\Gamma = 1. \tag{3.13}$$

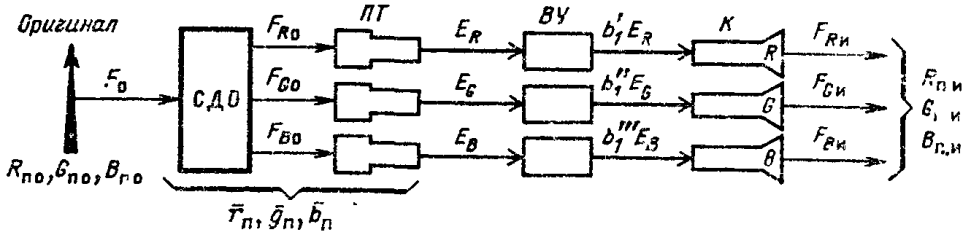


Рис. 3.7. Структурная схема тракта «от света до света» в цветном телевидении с линейным приемником ($\gamma_к = 1$)

В этом случае градации яркости цвета воспроизводятся без искажений. В цветном телевидении $\Gamma = \gamma_{п.т\,i}\gamma_{к\,i}/\gamma_{гк\,i}$, где $\gamma_{п.т}$ — градиент передающего тракта включая передающую трубку, или твердотельный преобразователь света в электрический сигнал (например, передающая трубка имеет $\gamma_{п.т} \leqslant 1$); $\gamma_{к\,i}$ — градиент преобразователя сигнала в свет с трактом приемника (например, кинескоп имеет $\gamma_{к\,i} > 1$); $\gamma_{гк\,i}$ — коэффициент нелинейности гамма-корректора ($\gamma_{гк\,i} > 1$). Здесь i обозначает каналы R, G, B. Для выполнения (3.13) необходимо, чтобы

$$\Gamma = \gamma_{п.т\,i}\,\gamma_{к\,i}/\gamma_{гк\,i} = 1. \qquad (3.14)$$

Условия (3.14) обычно достигают путем подбора градиента гамма-корректора $\gamma_{гк\,i}$, удовлетворительная работа которого возможна только, когда значения $\gamma_{к\,i}$ и $\gamma_{п.т\,i}$ постоянны во всем диапазоне яркостей передаваемой сцены для трех основных цветов приемника [110]. Отклонение значения $\gamma_{к\,i}$ от номинального должно быть не более ± 4 % как для трех каналов одного цветного кинескопа, так и для кинескопов всех цветных телевизоров. Схема преобразования свет — сигнал и сигнал — свет показана на рис. 3.7 для случая, когда кинескоп приемника является *линейным* прибором (т. е. для $\gamma_к = 1$). Приемник с таким кинескопом назовем *линейным*. Передающая камера содержит светоделительную (светорасщепляющую) оптику СДО, разделяющую световой поток F_0 от передаваемой сцены на три составляющие — красный F_{Ro}, зеленый F_{Go} и синий F_{Bo}; три передающие трубки ПТ, преобразующие эти три световых потока в видеосигналы E_R, E_G, E_B. На рисунке: ВУ — видеоусилители этих трех сигналов, К — кинескопы, создающие основные цвета приемника со световыми потоками $F_{Rи}$, $F_{Gи}$, $F_{Bи}$ (три кинескопа вместо одного трехцветного показаны для большей наглядности).

Рассмотрим условия колориметрически верной цветопередачи в системе основных цветов приемника $R_п G_п B_п$. В этой системе цвет оригинала имеет координаты $R_{п.о}$, $G_{п.о}$, $B_{п.о}$, а цвет его изображения $R_{п.и}$, $G_{п.и}$, $B_{п.и}$. Видеосигналы, получаемые от передающей камеры, должны создавать в приемнике количества его основных цветов $R_{п.и}$, $G_{п.и}$, $B_{п.и}$, смесь которых воспроизводит цветность передавае-

мой сцены. Координаты цвета $R_{п.о}$, $G_{п.о}$, $B_{п.о}$, $R_{п.и}$, $G_{п.и}$, $B_{п.н}$ определяют аналогично (2.9).

С учетом (3.6) и (3.9) колориметрически правильная цветопередача обеспечивается при выполнении условий (3.14) и

$$R_{п.и}=kR_{п.о};\ G_{п.и}=kG_{п.о};\ B_{п.и}=kB_{п.о} \tag{3.15}$$

По аналогии с (2.240) напишем формулы для координат цвета оригинала в системе основных цветов приемника

$$R_{п.о}=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\bar{r}_п\,P_\lambda\,d\lambda;\quad G_{п.о}=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\bar{g}_п\,P_\lambda\,d\lambda;$$

$$B_{п.о}=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\bar{b}_п\,P_\lambda\,d\lambda, \tag{3.16}$$

где $\bar{r}_п$, $\bar{g}_п$, $\bar{b}_п$ — удельные координаты спектральных цветов в этой системе; P_λ — спектральная плотность мощности излучения оригинала.

На выходе видеоусилителей передающей камеры получим сигналы:

$$E_R=a_R\left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}S_{\lambda R}\,P_\lambda\,d_\lambda\right)^{\gamma_{п.т\,R}};\ E_G=a_G\left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}S_{\lambda G}\,P_\lambda\,d_\lambda\right)^{\gamma_{п.т\,G}};$$

$$E_B=a_B\left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}S_{\lambda B}\,P_\lambda\,d_\lambda\right)^{\gamma_{п.т\,B}}, \tag{3.17}$$

где $S_{\lambda R}$, $S_{\lambda G}$, $S_{\lambda B}$ — спектральные характеристики чувствительности камеры, мкА/Вт; a_R, a_G, a_B — постоянные коэффициенты для перехода от микроампер к вольтам. Если

$$S_{\lambda R}=\bar{r}_п;\ S_{\lambda G}=\bar{g}_п;\ S_{\lambda B}=\bar{b}_п, \tag{3.18}$$

то из сравнения (3.17) и (3.16) получим

$$E_R=a_R\,R_{п.о}^{\gamma_{п.т}R};\ E_G=a_G\,G_{п.о}^{\gamma_{п.т}G};\ E_B=a_B\,B_{п.о}^{\gamma_{п.т}B}. \tag{3.19}$$

Сигналы (3.19) должны быть широкополосными, чтобы четкость изображения в приемниках черно-белого и цветного телевидения была хорошей. Их можно назвать *линейными*, если $\gamma_{п.т\,i}=1$.

Для выполнения (3.15) необходимо соблюдать в приемнике следующие условия при $\gamma_{п.т\,i}=1$:

$$R_{п.и}=a_1\,E_R;\ G_{п.и}=a_2\,E_G;\ B_{п.и}=a_3\,E_B,$$

$$a_1\,a_R=a_2\,a_G=a_3\,a_B=k. \tag{3.20}$$

Действительно, подставив (3.19) в (3.20), получим (3.15). Здесь a_1, a_2, a_3 — постоянные коэффициенты, т. е. приемник, отвечающий условию (3.20), будет линейным.

Покажем, что (3.15) означает выполнение условия (3.13). Для этого по аналогии с (2.9) напишем выражения для координат цвета оригинала и изображения

$$R_{\text{п.о}} = L_{R\text{о}}/L_{(R\text{о})};\ G_{\text{п.о}} = L_{G\text{о}}/L_{(G\text{о})};$$
$$B_{\text{п.о}} = L_{B\text{о}}/L_{(B\text{о})};$$
$$R_{\text{п.и}} = L_{R\text{н}}/L_{(R\text{н})};\ G_{\text{п.и}} = L_{G\text{н}}/L_{(G\text{н})};$$
$$B_{\text{п.и}} = L_{B\text{н}}/L_{(B\text{и})}, \tag{3.21}$$

где $L_{R\text{о}}$, $L_{G\text{о}}$, $L_{B\text{о}}$ — яркости основных цветов приемника, необходимые для согласования с цветом оригинала; $L_{(B\text{о})}$, $L_{(G\text{о})}$, $L_{(B\text{о})}$, $L_{(R\text{н})}$, $L_{(G\text{н})}$, $L_{(B\text{н})}$ — яркости единичных количеств основных цветов оригинала и изображения в системе $R_{\text{п}}G_{\text{п}}B_{\text{п}}$, установленные при согласовании с одним и тем же равностимульным цветом $Ц_{\text{р}}$.

Подставив (3.21) в (3.15), получим для колориметрически правильной цветопередачи, при $\gamma_{\text{п.т}} = 1$;

$$L_{R\text{н}} = k\frac{L_{(R\text{н})}}{L_{(R\text{о})}}L_{R\text{о}};\ L_{G\text{и}} = k\frac{L_{(G\text{н})}}{L_{(G\text{о})}}L_{G\text{о}};$$
$$L_{B\text{и}} = k\frac{L_{(B\text{и})}}{L_{(B\text{о})}}L_{B\text{о}}. \tag{3.22}$$

Вследствие выбора равностимульного цвета $Ц_{\text{р}}$ для оригинала и изображения справедливо

$$L_{(R\text{н})}/L_{(R\text{о})} = L_{(G\text{н})}/L_{(G\text{о})} = L_{(B\text{и})}/L_{(B\text{о})} = a = \text{const}, \tag{3.23}$$

Полные яркости изображения и оригинала равны:

$$L_{\text{и}} = L_{R\text{и}} + L_{G\text{н}} + L_{B\text{и}};\ L_{\text{о}} = L_{R\text{о}} + L_{G\text{о}} + L_{B\text{о}}. \tag{3.24}$$

Подставив (3.22) в (3.24), получим при $\gamma_{\text{п.т}} = 1$

$$L_{\text{и}} = akL_{\text{о}}, \tag{3.25}$$

что соответствует (3.13).

Таким образом, для колориметрически верной цветопередачи необходимо, чтобы зависимости координат цвета изображения $R_{\text{п}\cdot\text{и}}$, $G_{\text{п}\cdot\text{и}}$, $B_{\text{п}\cdot\text{и}}$ от координат цвета оригинала $R_{\text{п.о}}$, $G_{\text{п.о}}$, $B_{\text{п.о}}$ соответственно были линейными (см. (3.15)) и чтобы соблюдалось условие $R_{\text{п.н}}/R_{\text{п.о}} = G_{\text{п}\cdot\text{н}}/G_{\text{п}\cdot\text{о}} = B_{\text{п}\cdot\text{и}}/B_{\text{п}\cdot\text{о}} = k$. Для этого спектральные характеристики чувствительности каналов R, G, B передающей камеры на участке от входа съемочного объектива до выхода передающей трубки были соответственно равны удельным координатам $\bar{r}_{\text{п}}$, $\bar{g}_{\text{п}}$, $\bar{b}_{\text{п}}$ в системе основных цветов приемника (см. (3.18)). В этом случае при линейных приемнике ($\gamma_{\text{к}} = 1$) и передающих трубках ($\gamma_{\text{п.т}} = 1$) все зависимости: между координатами цвета изображения $R_{\text{п}\cdot\text{и}}$, $G_{\text{п}\cdot\text{и}}$, $B_{\text{п}\cdot\text{и}}$ и сигналами E_R, E_G, E_B (см. (3.20)), между яркостью изображения и яркостью оригинала (см. (3.13)), будут линейными. Таким образом, для обеспече-

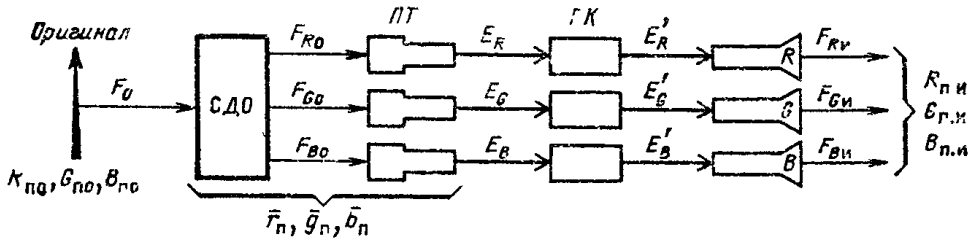


Рис. 3.8. Структурная схема тракта «от света до света» в цветном телевидении с нелинейным приемником ($\gamma_к \neq 1$)

ния колориметрическн верной цветопередачи необходимо выполнять условия (3.15), (3.18), (3.20), (3.13).

Для расчета удельных координат $\bar{r}_п$, $\bar{g}_п$, $\bar{b}_п$ необходимо перейти от системы XYZ МКО-1931 г. к системе $R_п G_п B_п$, задавшись матрицей F и находя матрицу M_c^{-1} из (2.165), заменив X, Y, Z на $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ и R, G, B на $\bar{r}_п$, $\bar{g}_п$, $\bar{b}_п$, (см. Приложение).

В реальных кинескопах яркость изображения на экране $L_и$ нелинейно зависит от размаха сигнала E (степенная функция с показателем степени $\gamma_к$), т. е. (3.20) не выполняется, поэтому во избежание искажений цветопередачи и для выполнения (3.22) сигналы E_R, E_G, E_B подвергают *гамма-коррекции*, компенсирующей нелинейности передающей камеры и кинескопа приемника. С помощью гамма-корректора сигналы E_R, E_G, E_B возводят в степень $\gamma_{гк}^{-1}$ (т. е. подвергают извлечению корня степени $\gamma_{гк}$), после чего они становятся *нелинейными*. Обозначим нелинейные сигналы штрихом:

$$E'_R = E_R^{1/\gamma_{гк\,R}};\ E'_G = E_G^{1/\gamma_{гк\,G}};\ E'_B = E_B^{1/\gamma_{гк\,B}}. \tag{3.26}$$

Подставив E_R, E_G, E_B из (3.20) в (3.26), получим

$$E'_R = (R_{п.и}/a_1)^{1/\gamma_{гк\,R}};\ E'_G = (G_{п.и}/a_2)^{1/\gamma_{гк\,G}};$$

$$E'_B = (B_{п.и}/a_3)^{1/\gamma_{гк\,B}}. \tag{3.27}$$

Схема тракта цветного телевидения от света до света (рис. 3.8) включает в себя приемник с нелинейным кинескопом ($\gamma_к \neq 1$). Такой приемник назовем *нелинейным*. Здесь на выходе гамма-корректора создаются сигналы E'_R, E'_G, E'_B.

Яркость свечения люминофора кинескопа $L_{iи}$ зависит от размаха сигнала E_i, приложенного между управляющим электродом (модулятором) и катодом кинескопа [ср. с (3.20)]:

$$L_{iи} = A_i E_i^{\gamma_{кi}}, \tag{3.28}$$

где A_i — постоянный коэффициент.

Подставив в (3.28) индексы R, G, B вместо i и E'_R, E'_G, E'_R вместо E_i, получим соответственно яркости красного, зеленого и синего свечений люминофоров кинескопа:

$$L_{Rи} = A_R (E'_R)^{\gamma_{кR}}; \; L_{Gи} = A_G (E'_G)^{\gamma_{кG}};$$
$$L_{Bи} = A_B (E'_B)^{\gamma_{кB}}. \qquad (3.29)$$

Подставив (3.26) в (3.29), имеем

$$L_{Rи} = A_R (E_R^{1/\gamma_{гкR}})^{\gamma_{кR}} = A_R E_R^{\gamma_{кR}/\gamma_{гкR}};$$
$$L_{Gи} = A_G (E_G^{1/\gamma_{гкG}})^{\gamma_{кG}} = A_G E_R^{\gamma_{кG}/\gamma_{гкG}};$$
$$L_{Bи} = A_B (E_B^{1/\gamma_{гкB}})^{\gamma_{кB}} = A_B E_R^{\gamma_{кB}/\gamma_{гкB}}. \qquad (3.30)$$

Рассмотрим условия верности цветопередачи в нелинейном приемнике. Если $\gamma_{кR} = \gamma_{кG} = \gamma_{кB} = \gamma_{гкR} = \gamma_{гкG} = \gamma_{гкB}$, получим из (3.30)

$$L_{Rи} = A_R E_R; \; L_{Gи} = A_G E_G; \; L_{Bи} = A_B E_B. \qquad (3.31)$$

Подставив в (3.31), E_R, E_G, E_B и k из (3.20) и используя (3.15), при $\gamma_{п.тi} = 1$ получим

$$L_{Rи} = A_R (k/a_1) R_{п.о} = A_R a_R; \; R_{п.о} = A'_R R_{п.о};$$
$$L_{Gи} = A_G (k/a_2) G_{п.о} = A_G a_G G_{п.о} = A'_G G_{п.о};$$
$$L_{Bи} = A_B (k/a_3) B_{п.о} = A_B a_B B_{п.о} = A'_B B_{п.о}, \qquad (3.32)$$

где коэффициенты a_R, a_G, a_B определены в (3.19); $A'_R = A_R a_R$; $A'_G = A_G a_G$; $A'_B = A_B a_B$. Подставив в (3.32) $L_{Rи}$, $L_{Gи}$, $L_{Bи}$ из (3.21), получим выражения, аналогичные (3.15), если $A'_R/L_{Rи} = A'_G/L_{(Gи)} = A'_B/L_{(Bи)} = k$, т. е. колориметрическая правильность цветопередачи не будет нарушена.

Определим координаты цвета изображения для нелинейного приемника. Подставив $L_{Rи}$, $L_{Gи}$, $L_{Bи}$ из (3.21), в (3.29), получим

$$R_{п.и} = A'_R (E'_R)^{\gamma_{кR}}; \; G_{п.и} = A'_G (E'_G)^{\gamma_{кG}};$$
$$B_{п.и} = A'_B (E'_B)^{\gamma_{кB}}, \qquad (3.33)$$

где $A'_R = A_R/L_{(Rи)}$; $A'_G = A'_G/L_{(Gи)}$; $A'_B = A_B/L_{(Bи)}$.

Подставив в (3.33) значения сигналов из (3.26), используя условие $\gamma_{кR} = \gamma_{кG} = \gamma_{кB} = \gamma_{гк}$ при $\gamma_{п\,т} = 1$, получим для нелинейного приемника

$$R_{п.и} = A'_R E_R; \; G_{п.и} = A'_G E_G; \; B_{п.и} = A'_B E_B, \qquad (3.34)$$

что аналогично (3.20).

Условия колорнметрическн правильной цветопередачи можно также выразнть через модули основных цветов приемннка в снстеме XYZ МКО-1931 г. Пусть $m_{R\text{о}}$, $m_{G\text{о}}$, $m_{B\text{о}}$ — модулн основных цветов прнемннка в системе XYZ, необходнмые для получения цвета оригнала путем смеси цветов $R_{\text{п}}$, $G_{\text{п}}$, $B_{\text{п}}$, а $m_{R\text{и}}$, $m_{G\text{и}}$, $m_{B\text{и}}$ — модули этих цветов в изображении в снстеме XYZ, получаемых прн подаче на кинескоп снгналов E'_R, E'_G, E'_B. Тогда

$$m_{R\text{о}} = X_{R\text{о}} + Y_{R\text{о}} + Z_{R\text{о}};\ m_{G\text{о}} = X_{G\text{о}} + Y_{G\text{о}} + Z_{G\text{о}};$$
$$m_{B\text{о}} = X_{B\text{о}} + Y_{B\text{о}} + Z_{B\text{о}};$$
$$m_{R\text{и}} = X_{R\text{и}} + Y_{R\text{и}} + Z_{R\text{и}};\ m_{G\text{и}} = X_{G\text{и}} + Y_{G\text{и}} + Z_{G\text{и}};$$
$$m_{B\text{и}} = X_{B\text{и}} + Y_{B\text{и}} + Z_{B\text{и}}, \qquad (3.35)$$

где X, Y, Z с соответствующимн нндексами — координаты цвета основных цветов прнемника в снстеме XYZ при полученнн цветов орнгннала и нзображення соответственно. Модулн цветов орнгинала и изображения в снстеме XYZ:

$$m_{\text{о}} = X_{\text{о}} + Y_{\text{о}} + Z_{\text{о}} = m_{R\text{о}} + m_{G\text{о}} + m_{B\text{о}};$$
$$m_{\text{и}} = X_{\text{и}} + Y_{\text{и}} + Z_{\text{и}} = m_{R\text{и}} + m_{G\text{и}} + m_{B\text{и}}, \qquad (3.36)$$

где X, Y, Z с соответствующимн индексами — координаты цвета оригинала и изображення в снстеме XYZ. Еслн

$$m_{R\text{и}} = km_{R\text{о}};\ m_{G\text{и}} = km_{G\text{о}},\ m_{B\text{и}} = km_{B\text{о}},\ \text{то}\ m_{\text{и}} = km_{\text{о}}. \qquad (3.37)$$

Если x_R, x_G, x_B — координаты цветности x основных цветов прнемннка $R_{\text{п}}$, $G_{\text{п}}$, $B_{\text{п}}$ в системе XYZ. то координаты цветностн изображення и оригинала соответственно:

$$x_{\text{и}} = X_{\text{и}}/m_{\text{и}} = (X_{R\text{и}} + X_{G\text{и}} + X_{B\text{и}})/m_{\text{и}} =$$
$$= (x_R\, m_{R\text{и}} + x_G\, m_{G\text{и}} + x_B\, m_{B\text{и}})/m_{\text{и}}; \qquad (3.38)$$
$$x_{\text{о}} = X_{\text{о}}/m_{\text{о}} = (X_{R\text{о}} + X_{G\text{о}} + X_{B\text{о}})/m_{\text{о}} =$$
$$= (x_R\, m_{R\text{о}} + x_G\, m_{G\text{о}} + x_B\, m_{B\text{о}})/m_{\text{о}}, \qquad (3.39)$$

Так как

$$X_{R\text{и}} = x_R\, m_{R\text{и}};\ X_{G\text{и}} = x_G\, m_{G\text{к}};\ X_{B\text{и}} = x_B\, m_{B\text{и}};$$
$$X_{R\text{о}} = x_R\, m_{R\text{о}};\ X_{G\text{о}} = x_G\, m_{G\text{о}};\ X_{B\text{о}} = x_B\, m_{B\text{о}}. \qquad (3.40)$$

Подставляя (3.37) н (3.38) в (3.39), прн выполненин (3.37) получаем $x_{\text{и}} = x_{\text{о}}$, аналогично можно получнть $y_{\text{и}} = y_{\text{о}}$. Формула (3 37) является условием неискажений цветопередачн, выраженным через модули основных цветов изображения и оригнала $m_{\text{и}}$ и $m_{\text{о}}$.

Влияние контрастностей изображения $C_{\text{и}}$ и оригинала $C_{\text{о}}$ на воспроизведение цветности и яркости. Под контрастностью будем поннмать отношение максимальной яркостн к мнимальной. Если контрастностн оригинала н изображення $C_{\text{о}} \neq C_{\text{и}}$, то во избежание нскажений вос-

приятия в изображении изменений яркости $\Delta L_и$ необходимо, чтобы отличие между контрастностями изображения и оригинала распределялось равномерно по всему диапазону яркости изображения, т. е. выполнить условие:

$$dL_{iи}/L_{iи} = \Gamma_i\, dL_o/L_o, \tag{3,41}$$

где dL_0 и $dL_{iи}$ — изменения яркостей основных цветов приемника оригинала и изображения; i — индексы R, G, B.

Интегрируя (3.41), получаем

$$L_{iи} = k_i\, L_o^{\Gamma_i}, \tag{3.42}$$

где k_i — постоянный коэффициент. Максимальная и минимальная яркости цветов оригинала и изображения

$$L_{i\,и.\,макс} = k_i\, L_{o.\,макс}^{\Gamma_i};\ L_{iи.\,мин} = k_i\, L_{o.\,мин}^{\Gamma_i}, \tag{3.43}$$

а контрастности цветов оригинала и изображения

$$C_o = L_{o.макс}/L_{o.\,мин};$$

$$C_и = L_{iи.\,макс}/L_{iи.мин} = (L_{o.\,макс}/L_{o.\,мин})^{\Gamma_i} = C_o^{\Gamma_i}. \tag{3.44}$$

Из (3.44) следует

$$\Gamma_i = \lg C_и/\lg C_o, \tag{3.45}$$

Если $C_и \neq C_0$, то $\Gamma_i \neq 1$, что является нарушением условия (3.13) и означает наличие искажений цветопередачи. Таким образом, если выполнить (3.45) путем подбора значения $\gamma_{гк}$, получим удовлетворительное воспроизведение изменений яркости в изображении, но цветопередача будет искаженной. Во избежание искажений следует иметь

$$C_и = C_o;\ \Gamma_i = 1. \tag{3.46}$$

Таким образом, во избежание искажений цветопередачи должно быть равенство контрастностей изображения и оригинала $C_и = C_0$. При передаче изображения на кинопленке под C_0 следует понимать контрастность изображения на кинопленке фильма $C_ф$. При дневном освещении контрастность окружающих нас предметов 160:1 (в среднем). В киносъемочных и телевизионных студиях коэффициент отражения обычно равен для белого 0,8; для черного 0,04; т. е. $\rho_{макс} = 0{,}8$; $\rho_{мин} = 0{,}04$; $\rho_{макс}/\rho_{мин} = 0{,}8/0{,}04 = 20$. Для правильной передачи относительной яркости объектов в изображении необходимо, чтобы освещенность передаваемой или снимаемой на кинопленку сцены была достаточно равномерной. При съемке цветных кинофильмов в киносъемочных студиях допустимая неоднородность освещения должна быть не более 4:1; в студиях цветного телевидения 2:1 (рекомендуется избегать поверхностей оригинала, создающих блики, или белых поверхностей, имеющих большой коэффициент отражения).

Таким образом, при киносъемках с учетом коэффициентов отражения поверхностей максимальная контрастность оригинала $C_0 =$

$= 4\rho_{макс}/\rho_{мин} = 4 \cdot 20 = 80{:}1$, а в телевизионных студиях $C_0 = 2\rho_{макс}/\rho_{мин} = 2 \cdot 20 = 40{:}1$. Максимальная оптическая плотность цветной позитивной киноленты $D_{макс} = 2{,}5 \ldots 3$, т. е. минимальное значение коэффициента пропускания $\tau_{мин} = 0{,}003 \ldots 0{,}001$; максимальное значение этого коэффициента $\tau_{макс} = 0{,}8$, причем $C_ф = \tau_{макс}/\tau_{мин} = 0{,}8/(0{,}003 \ldots 0{,}001) = (270 \ldots 800){:}1$. Максимальная оптическая плотность изображения на киноэкране $D_{макс} = 1{,}85 \ldots 2$ на черном что соответствует относительной яркости изображения 0,014 ... 0,01, если принять яркость на белом за единицу. Таким образом, контрастность изображения на киноэкране $C_и = (72 \ldots 80){:}1$. При демонстрации цветных кинофильмов на экранах кинотеатров выполняется условие $C_0 = C_и$, поэтому искажения цветопередачи из-за несогласованности C_0 и $C_ф$ не возникают. Контрастность изображения на экране кинескопов на крупных участках: в черно-белом телевидении $C_и = 100$, в цветном телевидении $C_и = 20 \ldots 40$ (в слабо освещенной комнате), т. е. в цветном телевидении $C_и$ и $C_ф$ могут оказаться несогласованными; для выполнения (3.46) следует повышать $C_и$ или уменьшать $C_и$. При передаче в цветном телевидении цветных кинофильмов разница между $C_и$ и $C_ф$ может быть большой и для уменьшения искажений цветопередачи, возникающих по этой причине, необходимы специальные меры, например уменьшение $C_ф$ при киносъемке и обработке кинопленки, введение цветокоррекции и коррекции яркости и т. д.

3.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЯРКОСТЕЙ ОСНОВНЫХ ЦВЕТОВ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАДАННОГО ЦВЕТА ИХ СМЕСИ

Если известны координаты цветности трех основных цветов приемника $x_1, x_2, x_3; y_1, y_2, y_3, z_1, z_2, z_3$ соответственно и координаты цветности $x_ц, y_ц, z_ц$ некоторого заданного цвета $Ц$, то аналитическим или графическим методом можно найти относительные яркости основных цветов L_1', L_2', L_3', необходимые для получения цветности цвета $Ц$.

Аналитический метод. Обозначим $L_1, L_2, L_3, L_ц$ — яркости основных цветов приемника и цвета $Ц$. В соответствии с (2.226) напишем координаты цвета $Ц$:

$$X_Ц = X_1 + X_2 + X_3; \; Y_Ц = Y_1 + Y_2 + Y_3; \; Z_Ц = Z_1 + Z_2 + Z_3. \qquad (3.47)$$

По (2.250) и (2.251) находим для трех основных цветов приемника их модули и координаты цвета в системе XYZ при получении цвета $Ц$:

$$m_1 = X_1 + Y_1 + Z_1; \; m_2 = X_2 + Y_2 + Z_2; \; m_3 = X_3 + Y_3 + Z_3; \qquad (3.48)$$

$$X_1 = m_1 x_1; \; X_2 = m_2 x_2; \; X_3 = m_3 x_3;$$

$$Y_1 = m_1 y_1; \; Y_2 = m_2 y_2; \; Y_3 = m_3 y_3;$$

$$Z_1 = m_1 z_1; \; Z_2 = m_2 z_2; \; Z_3 = m_3 z_3. \qquad (3.49)$$

Обозначим $m_{Ц}$ — модуль цвета $Ц$. Тогда на основании (2.250) и (2.249) имеем

$$m_{Ц} = X_{Ц} + Y_{Ц} + Z_{Ц} = Y_{Ц}/y_{Ц}. \tag{3.50}$$

По аналогии с (3.49) и с учетом (3.50) напишем

$$X_{Ц} = m_{Ц}\, x_{Ц} = Y_{Ц}\, x_{Ц}/y_{Ц};\quad Y_{Ц} = m_{Ц}\, y_{Ц};$$

$$Z_{Ц} = m_{Ц}\, z_{Ц} = Y_{Ц}\, z_{Ц}/y_{Ц}. \tag{3.51}$$

Подставляя (3.49) в (3.47) и учитывая (3.51), имеем

$$X_{Ц} = m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 = Y_{Ц}\, x_{Ц}/y_{Ц};$$

$$Y_{Ц} = m_1 y_1 + m_2 y_2 + m_3 y_3;$$

$$Z_{Ц} = m_1 z_1 + m_2 z_2 + m_3 z_3 = Y_{Ц}\, z_{Ц}/y_{Ц}. \tag{3.52}$$

Из (3.52) находим m_1, m_2, m_3, пользуясь (2.67), (2.71); (2.74) и (2.75) и $z = 1 - (x + y)$:

$$m_1 = (Y/y_{Ц})\,[x_{Ц}\,(y_2 - y_3) - y_{Ц}\,(x_2 - x_3) + x_2 y_3 - x_3 y_2]/D;$$

$$m_2 = (Y/y_{Ц})\,[x_{Ц}\,(y_3 - y_1) - y_{Ц}\,(x_3 - x_1) - x_1 y_3 + x_3 y_1]/D;$$

$$m_3 = (Y/y_{Ц})\,[x_{Ц}\,(y_1 - y_2) - y_{Ц}\,(x_1 - x_2) + x_1 y_2 - x_2 y_1]/D, \tag{3.53}$$

где $$D = x_1\,(y_2 - y_3) + x_2\,(y_3 - y_1) + x_3\,(y_1 - y_2). \tag{3.54}$$

С учетом (3.49) получим искомые относительные значения яркостей основных цветов приемника:

$$L'_1 = L_1/L_{Ц} = Y_1/Y_{Ц} = m_1 y_1/Y_{Ц} = \alpha;$$

$$L'_2 = L_2/L_{Ц} = Y_2/Y_{Ц} = m_2 y_2/Y_{Ц} = \beta,$$

$$L'_3 = L_3/L_{Ц} = Y_3/Y_{Ц} = m_3 y_3/Y_{Ц} = \delta;$$

$$L_{Ц} = L_1 + L_2 + L_3;\quad L'_1 + L'_2 + L'_3 = \alpha + \beta + \delta = 1. \tag{3.55}$$

Воспользовавшись этими обозначениями, получим

$$\alpha = L'_1 = (y_1/y_{Ц})\,[x_{Ц}\,(y_2 - y_3) - y_{Ц}\,(x_2 - x_3) + x_2 y_3 - x_3 y_2]/D;$$

$$\beta = L'_2 = (y_2/y_{Ц})\,[x_{Ц}\,(y_3 - y_1) - y_{Ц}\,(x_3 - x_1) - x_1 y_3 + x_3 y_1]/D;$$

$$\delta = L'_3 = (y_3/y_{Ц})\,[x_{Ц}\,(y_1 - y_2) - y_{Ц}\,(x_1 - x_2) + x_1 y_2 - x_2 y_1]/D. \tag{3.56}$$

Эти формулы можно также получить из (2.286) ... (2.288).

Пример. Пользуясь (3.56), получим, что основные цвета приемника NTSC, координаты цветности которых даны в табл. 3.4, для создания цветности стандартного источника белого цвета C (из табл. 2.10 имеем $x_C = 0{,}31006$; $y_C = 0{,}31616$; $Z_C = 0{,}37378$) должны иметь относительные яркости [1], равные:

$$\alpha = L'_1 = L'_R = 0{,}29891;\quad \beta = L'_2 = L'_G = 0{,}58662;$$

$$\delta = L'_3 = L'_B = 0{,}11448. \tag{3.57}$$

[1] Здесь и в дальнейшем индексы R, G, B применены вместо $R_{Ц}$, $G_{Ц}$, $B_{Ц}$ для краткости.

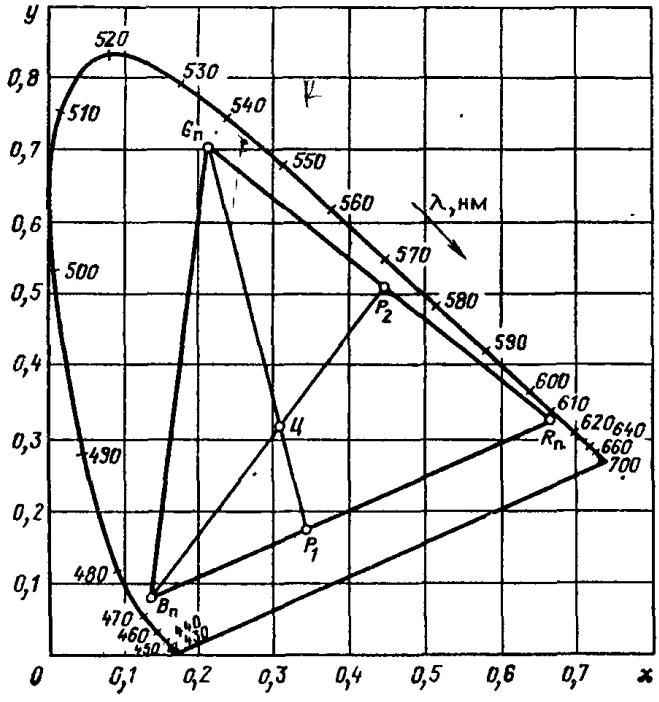


Рис. 3.9. Графнческий метод определенння относительных яркостей основных цветов при полученнн цвета *Ц*

△ NTSC.

Аналогично найдем для основных цветов приемиика ЕС н белого D_{65} (см. табл. 3.4)

$$\alpha = L'_R = 0{,}22272; \quad \beta = L'_G = 0{,}70600;$$

$$\delta = L'_B = 0{,}07128. \tag{3.58}$$

Теперь решнм обратную задачу — найдем координаты цветности $x_Ц$, $y_Ц$, $z_Ц$ точкн *Ц*, для которой заданы относительные яркостн осиовных цветов приемнн-ка. Для этого надо найти $x_Ц$ н $y_Ц$ нз первых двух уравнений (3.56), прн условии $L'_1 + L'_2 + L'_3 = 1$, илн воспользоваться (2.286)—(2.288), заменнв L_1, L_2, L_3 на L'_1, L'_2, L'_3. Напрнмер, найдем координаты цветностн *равнояркого цвета Ця*, для которого $L'_1 = L'_2 = L'_3 = 1/3$ в треугольннке основных цветов приемника NTSC, показанного на рнс. 3.9. Из табл. 3.4 нмеем $x_1 = 0{,}67$; $y_1 = 0{,}33$; $x_2 = 0{,}21$; $y_2 = 0{,}71$; $x_3 = 0{,}14$; $y_3 = 0{,}08$. Расчет по (2.286) ... (2.288) дает $x_Ц = 0{,}241$; $y_Ц = 0{,}177$.

Графическнй метод. На рис. 3.9 показан треугольник основных цветов прнемннка н точка некоторого заданного цвета *Ц*. Проведем прямые через точку *Ц* из точек $G_п$ н $B_п$. Тогда для длнн получившнхся отрезков можно напнсать в соответствнн с (2.230) н (2.280):

$$\frac{G_п P_2}{R_п P_2} = \frac{m_R}{m_G} = \frac{Y_R y_G}{Y_G y_R}; \quad \frac{B_п P_1}{R_п P_1} = \frac{m_R}{m_B} = \frac{Y_R y_B}{Y_B y_R}. \tag{3.59}$$

Далее из (3.59) найдем

$$Y_R = Y_G \frac{y_R}{y_G} \frac{G_п P_2}{R_п P_2} = Y_B \frac{y_R}{y_B} \frac{B_п P_1}{R_п P_1}. \tag{3.60}$$

Из (2.286) — (2.288) найдем яркости основных цветов и цвета $Ц$ относительно яркости цвета $R_п$:

$$L''_R = \frac{L_R}{L_R} = \frac{Y_R}{Y_R} = 1;\quad L''_G = \frac{L_G}{L_R} = \frac{Y_G}{Y_R};\quad L''_B = \frac{L_B}{L_R} = \frac{Y_B}{Y_R}, \tag{3.61}$$

$$L''_Ц = \frac{L_Ц}{L_R} = \frac{L_R + L_G + L_B}{L_R} = \frac{Y_R + Y_G + Y_B}{Y_R} =$$

$$= 1 + \frac{Y_G}{Y_R} + \frac{Y_B}{Y_R} = 1 + L''_G + L''_B. \tag{3.62}$$

Используя (3.60) и (3.62) получнм

$$L''_G = \frac{Y_G}{Y_R} = \frac{R_и P_2}{G_п P_2}\frac{y_G}{y_R};\quad L''_B = \frac{Y_B}{Y_R} = \frac{R_п P_1}{B_и P_1}\frac{y_B}{y_R}. \tag{3.63}$$

Яркостн основных цветов, выраженные относнтельно яркостн цвета $Ц$:

$$\alpha = L'_R = L_R/L_Ц = Y_R/(Y_R + Y_G + Y_B) = L''_R/L''_Ц;$$

$$\beta = L'_G = L_G/L_Ц = Y_G/(Y_R + Y_G + Y_B) = L''_G/L''_Ц;$$

$$\delta = L'_B = L_B/L_Ц = Y_B/(Y_R + Y_G + Y_B) = L''_B/L''_Ц, \tag{3.64}$$

что аналогнчно (3.55). Такнм образом, находнм L'_R, L'_G, L'_B, подставнв в (3.62) н (3.64) значення $L''_R = 1$; L''_G н L''_B, найденные нз (3.63) через отрезки, показанные на рнс. 3.9.

Теперь решнм графическн обратную задачу — найдем точку $Ц$, еслн для нее заданы L'_R, L'_G, L'_B. Из (3.64) находнм

$$Y_R + Y_G + Y_B = Y_R/L'_R;\quad Y_R/Y_G = L'_R/L'_G;$$

$$Y_R/Y_B = L'_R/L'_B. \tag{3.65}$$

Подставнв (3.65) в (3.60), получнм

$$\frac{G_п P_2}{R_п P_2} = \frac{L'_R y_G}{L'_G y_R} = A_1;\quad \frac{B_п P_1}{R_п P_1} = \frac{L'_R y_B}{L'_B y_R} = A_2. \tag{3.66}$$

Из рнс. 3.9 следует

$$G_п P_2 + R_п P_2 = R_п G_п;\quad B_п P_1 + R_п P_1 = B_и R_п. \tag{3.67}$$

Из (3.66) нмеем

$$G_п P_2 = A_1 (R_п P_2);\quad (B_п P_1) = A_2 (R_п P_1). \tag{3.68}$$

Подставнв (3.68) в (3.67), получнм

$$R_п P_2 = R_п G_п/(1 + A_1);\quad R_п P_1 = B_п R_п/(1 + A_2), \tag{3.69}$$

где A_1 и A_2 известны из (3.66), так как нзвестны L'_R, L'_G, L'_B, y_G, y_R, y_B. Отрезки $R_п G_п$ н $B_п R_п$ нзвестны нз рнс. 3.9. Зная A_1 и A_2, находнм отрезкн $R_п P_2$ и $R_п P_1$ н, таким образом, находим положенне точек P_2н P_1

па рис. 3.9.Проводя прямые $G_{\text{п}}P_1$ и $B_{\text{п}}P_2$, находим точку $Ц$ для заданных значений L'_R, L'_G, L'_B.

Получим еще несколько важных соотношении для яркости цвета $Ц$ изображения, получаемого смесью основных цветов приемника. В системе XYZ МКО—1931 г. для этого цвета

$$Y_{Цн} = Y_{RЦ} + Y_{GЦ} + Y_{BЦ}. \tag{3.70}$$

Так как яркости цветов $Ц$, $R_{\text{п}}$, $G_{\text{п}}$, $B_{\text{п}}$ относительно яркости равностимульного цвета $L_{\text{р}}$, на котором определяются яркости единичных количеств основных цветов приемника $L_{[R]}$, $L_{[G]}$, $L_{[B]}$, полностью определяются их координатой Y, т. е.

$$Y_{Цн} = L_Ц / L_{\text{р}}, \tag{3.71}$$

$$Y_{RЦ} = L_{RЦ}/L_{\text{р}};\ Y_{GЦ} = L_{GЦ}/L_{\text{р}};\ Y_{BЦ} = L_{BЦ}/L_{\text{р}}, \tag{3.72}$$

где $L_{\text{р}} = L_{[R]} + L_{[G]} + L_{[B]}$. (3.73)

Из (3.55) имеем

$$\alpha = L_{[R]}/L_{\text{р}};\ \beta = L_{[G]}/L_{\text{р}};\ \delta = L_{[B]}/L_{\text{р}};\ \alpha + \beta + \delta = 1. \tag{3.74}$$

Яркость цвета $Ц$

$$L_{Цн} = L_{RЦ} + L_{GЦ} + L_{BЦ}, \tag{3.75}$$

где $L_{RЦ}$, $L_{GЦ}$, $L_{BЦ}$ — яркости основных цветов приемника, смесь которых даст цвет $Ц$ с яркостью $L_{Цн}$. Координаты $Ц$ в системе $R_{\text{п}}G_{\text{п}}B_{\text{п}}$:

$$R_{\text{п}Ц} = L_{RЦ}/L_{[R]};\ G_{\text{п}Ц} = L_{GЦ}/L_{[G]};\ B_{\text{п}Ц} = L_{BЦ}/L_{[B]}. \tag{3.76}$$

Из (3.76) и (3.74) получим

$$L_{RЦ} = L_{[R]} R_{\text{п}Ц} = \alpha L_{\text{р}} R_{\text{п}Ц};\ L_{GЦ} = L_{[G]} G_{\text{п}Ц} = \beta L_{\text{р}} G_{\text{п}Ц};$$

$$L_{BЦ} = L_{[B]} B_{\text{п}Ц} = \delta L_{\text{р}} B_{\text{п}Ц}. \tag{3.77}$$

Подставив (3.77) в (3.72), получим

$$Y_{RЦ} = \alpha R_{\text{п}Ц};\ Y_{GЦ} = \beta G_{\text{п}Ц};\ Y_{BЦ} = \delta B_{\text{п}Ц}. \tag{3.78}$$

Подставив (3.77) в (3.75), имеем

$$L_Ц / L_{\text{р}} = \alpha R_{\text{п}Ц} + \beta G_{\text{п}Ц} + \delta B_{\text{п}Ц}. \tag{3.79}$$

Подставив (3.71) и (3.78 в (3.79), получим

$$Y_{Цн} = \alpha R_{\text{п}Ц} + \beta G_{\text{п}Ц} + \delta B_{\text{п}Ц} = Y_{RЦ} + Y_{GЦ} + Y_{BЦ}. \tag{3.80}$$

Пример. Пусть равностимульный эталонный цвет в системе $R_{\text{п}}G_{\text{п}}B_{\text{п}}$ имеет яркость $L_{\text{р}}$ 10 кд/м². Для цвета с такой яркостью выберем единичные количества основных цветов приемника в системе $R_{\text{п}}G_{\text{п}}B_{\text{п}}$. Тогда исходя из (3.74) получим их яркости в этой системе $L_{[R]}$ $\alpha L_{\text{р}}$ 0,299·10 2,99; $L_{[G]}$ $\beta L_{\text{р}}$ — 0 587·10 5,87; $L_{[B]}$ $\delta L_{\text{р}}$ 0,114·10 1,14 кд/м². Пусть для некоторого цвета $Ц$ основные цвета приемника взяты с яркостями $L_{RЦ}$, $L_{GЦ}$, $L_{BЦ}$, равными 6, 10, 4 кд м² соответственно, так что их смесь имеет яркость $L_Ц = L_{RЦ} + L_{GЦ} + L_{BЦ}$ 6 10 4 20 кд/м². Тогда в системе $R_{\text{п}}G_{\text{п}}B_{\text{п}}$ на основании (3.76) получим координаты цвета $Ц$:

$R_{\text{п}Ц} = L_{RЦ}/L_{[R]} = 6/2{,}99 = 2{,}01$; $G_{\text{п}Ц} = L_{GЦ}/L_{[G]} = 10/5{,}87 = 1{,}7$; $B_{\text{п}Ц} = L_{BЦ}/L_{[B]} = 4\ 1{,}14 = 3{,}52$. Из (3.78) получим $Y_{RЦ} = \alpha R_{\text{п}Ц} = 0{,}299 \cdot 2{,}01 = -0{,}6$, $Y_{GЦ} = \beta G_{\text{п}Ц} = 0{,}587 \cdot 1{,}70 = 1$; $Y_{BЦ} = \delta B_{\text{п}Ц} = 0{,}114 \cdot 3{,}52 = 0{,}4$. Подставив эти значения в (3.80), получим $Y_{Ци} = Y_{RЦ} + Y_{GЦ} + Y_{BЦ} = 0{,}6 - 1 + 0{,}4 = 2$.

Пользуясь (3.70) и (3.78), можно получить простые выражения для α, β, δ. Для этого на основании (2.23) напишем

$$Y_R = y_R m_R;\ Y_G = y_G m_G;\ Y_B = y_B m_B. \tag{3.81}$$

По аналогии с (2.199) получим

$$\begin{aligned} m_R &= r'_{\text{п}(X)} X + r'_{\text{п}(Y)} Y + r'_{\text{п}(Z)} Z; \\ m_G &= g'_{\text{п}(X)} X + g'_{\text{п}(Y)} Y + g'_{\text{п}(Z)} Z; \\ m_B &= b'_{\text{п}(X)} X + b'_{\text{п}(Y)} Y + b'_{\text{п}(Z)} Z. \end{aligned} \tag{3.82}$$

Подставив (3.82) в (3.81), получим

$$\begin{aligned} Y_R &= y_R (r'_{\text{п}(X)} X + r'_{\text{п}(Y)} Y + r'_{\text{п}(Z)} Z); \\ Y_G &= y_G (g'_{\text{п}(X)} X + g'_{\text{п}(Y)} Y + g'_{\text{п}(Z)} Z); \\ Y_B &= y_B (b'_{\text{п}(X)} X + b'_{\text{п}(Y)} Y + b'_{\text{п}(Z)} Z). \end{aligned} \tag{3.83}$$

Подставив (3.83) в (3.70), после простых преобразований получим

$$\begin{aligned} Y = &(r'_{\text{п}(X)} y_R + g'_{\text{п}(X)} y_G + b'_{\text{п}(X)} y_B) X + \\ &+ (r'_{\text{п}(Y)} y_R + g'_{\text{п}(Y)} y_G + b'_{\text{п}(Y)} y_B) Y + \\ &+ (r'_{\text{п}(Z)} y_R + g'_{\text{п}(Z)} y_G + b'_{\text{п}(Z)} y_B) Z. \end{aligned} \tag{3.84}$$

Из (3.84) следует, что

$$\begin{aligned} r'_{\text{п}(X)} y_R + g'_{\text{п}(X)} y_G + b'_{\text{п}(X)} y_B &= 0; \\ r'_{\text{п}(Y)} y_R + g'_{\text{п}(Y)} y_G + b'_{\text{п}(Y)} y_B &= 1; \\ r'_{\text{п}(Z)} y_R + g'_{\text{п}(Z)} y_G + b'_{\text{п}(Z)} y_B &= 0; \end{aligned} \tag{3.85}$$

По аналогии с (2.200) напишем

$$\begin{aligned} R_{\text{п}} &= m_R/(f_1 r'_{\text{п}(X)} + r'_{\text{п}(Y)} + f_2 r'_{\text{п}(Z)}); \\ G_{\text{п}} &= m_G/(f_1 g'_{\text{п}(X)} + g'_{\text{п}(Y)} + f_2 g'_{\text{п}(Z)}); \\ B_{\text{п}} &= m_B/(f_1 b'_{\text{п}(X)} + b'_{\text{п}(Y)} + f_2 b'_{\text{п}(Z)}). \end{aligned} \tag{3.86}$$

Подставив m_R, m_G, m_B из (3.86) в (3.81), используя (3.78), получим для цвета $Ц$:

$$\begin{aligned} Y_R &= y_R m_R = y_R R_{\text{п}} (f_1 r'_{\text{п}(X)} + r'_{\text{п}(Y)} + f_2 r'_{\text{п},z)}) = \alpha R_{\text{п}}; \\ Y_G &= y_G m_G = y_G G_{\text{п}} (f_1 g'_{\text{п}(X)} + g'_{\text{п}(Y)} + f_2 g'_{\text{п}(Z)}) = \beta G_{\text{п}}; \\ Y_B &= y_B m_B = y_B B_{\text{п}} (f_1 b'_{\text{п}(X)} + b'_{\text{п}(Y)} + f_2 b'_{\text{п}(Z)}) = \delta B_{\text{п}}, \end{aligned} \tag{3.87}$$

коэффициенты α, β, δ представляют собой относительные яркости основных цветов L'_R, L'_G, L'_B, необходимые для согласования цвета их

смеси с равностимульными в системе $R_пG_пB_п$ цветом $Ц_р$. Из (3.87) получим

$$\alpha = y_R (f_1 r'_{п(X)} + r'_{п(Y)} + f_2 r'_{п(Z)}) = y_R a_1;$$
$$\beta = y_G (f_1 g'_{п(X)} + g'_{п(Y)} + f_2 g'_{п(Z)}) = y_R a_2;$$
$$\delta = y_B (f_1 b'_{п(X)} + b'_{п(Y)} + f_2 b'_{п(Z)}) = y_B a_3, \qquad (3.88)$$

где коэффициенты a_1, a_2, a_3 определяются по аналогии с (2.203) (их значения даны в Приложении (см. П. 62). Значения α, β, δ были даны в (3.57) и (3.58).

3.5. ПОСТРОЕНИЕ СЕТКИ ПОСТОЯННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЯРКОСТЕЙ ОСНОВНЫХ ЦВЕТОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЦВЕТА ИХ СМЕСИ

Двойное отношение четырех точек прямой. Рассмотрим метод построения такой сетки на основе проективной геометрии, в которой изучаются свойства фигур, не изменяющиеся при их проекции на некоторую линию или поверхность с помощью пучка прямых (*центральное проектирование*), исходящих из одной общей точки S — *центр проекции*. Некоторые понятия проективной геометрии были изложены в § 2. 10. В этом методе используется *двойное* (*сложное*) отношение четырех точек прямой. При аффинном преобразовании фигур (параллельное проектирование) сохраняется рассмотренное в § 2.7 *простое отношение трех точек прямой* A, B, C (рис. 3. 10)

$$(ABC) = AC\ BC = \lambda, \qquad (3.89)$$

где AC и BC — отрезки этой прямой.

При параллельном проектировании точек A, B, C в точки A' B' C' на прямой исходящей из точки A получим $(A'B'C') = (ABC) = \lambda$. При центральном проектировании точек ABC из центра S в точки A', B'', C'' (точки A и A' совпадают) простое отношение трех точек не сохраняется, т. е. $(A'\ B''\ C'') \neq (ABC)$.

На рис. 3.11 точки M_1 и M_2 — основные (базисные), точки M_3 и M_4 — делящие. *Двойное* (*сложное или ангармоническое*) отношение четырех точек прямой M_1, M_2, M_3, M_4 обозначается $(M_1M_2M_3\ M_4)$ и равно отношению двух простых отношений трех точек этой прямой $(M_1M_2M_3)$ и $(M_1M_2M_4)$:

$$(M_1\ M_2\ M_3\ M_4) = \frac{(M_1\ M_2\ M_3)}{(M_1\ M_2\ M_4)} = \frac{M_1\ M_3}{M_2\ M_3} : \frac{M_1\ M_4}{M_2\ M_4} =$$
$$= \frac{M_1\ M_3}{M_2\ M_3}\ \frac{M_2\ M_4}{M_1\ M_4} = \frac{M_1\ M_3 \cdot M_2\ M_4}{M_2\ M_3 \cdot M_1\ M_4} = w, \qquad (3.90)$$

где w — значение этого отношения. [1]

[1] Это обозначение введено немецким математиком Штаудтом (1798—1867 гг.).

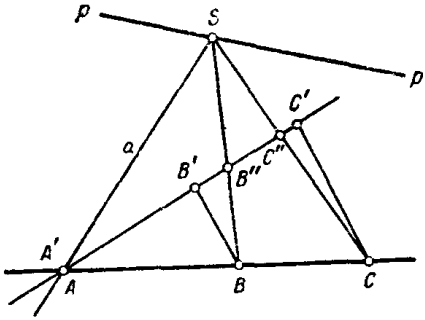


Рис. 3.10. Точки A, B, C их параллельная (A', B', C') и центральная (A', B'', C'') проекции

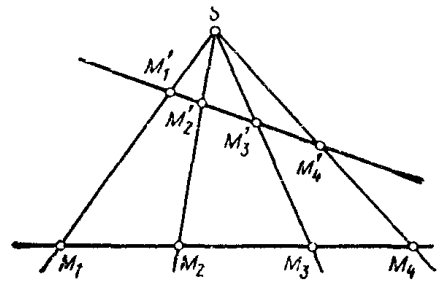


Рис. 3.11. Точки M_1, M_2, M_3, M_4 и их центральная проекция (точки M'_1, M'_2, M'_3, M'_4)

При этом, если обе делящие точки расположены внутри отрезка M_1M_4 или обе — вне этого отрезка, $\omega > 0$; если же одна делящая точка находится внутри отрезка M_1M_4, а другая — вне его, то $\omega < 0$ Обозначим простые отношения $(M_1M_2M_3) = \lambda$ и $(M_1M_2M_4) = \mu$. Тогда $w = (M_1M_2M_3M_4) = \lambda/\mu$. Если $\lambda = -\mu$, то четверка точек $M_1M_2M_3M_4$ называется *гармонической* и для нее $w = -1$.

При центральном проектировании сохраняется двойное отношение четырех точек, лежащих на одной прямой, пересекающей пучок прямых, исходящих из точки S, независимо от положения этой прямой, т.е. $(M_1M_2M_3M_4) = (M'_1M'_2M'_3M'_4) = w$, как показано на рис. 3.11, где M'_1, M'_2, M'_3, M'_4 — центральные проекции точек M_1, M_2, M_3, M_4 соответственно. Если точка M_4 движется по прямой $M_1M_2M_3$, то, пользуясь значениями (ABC), $= \lambda$ данными в табл. 3.2, получаем характерные значения w, приведенные в табл. 3.2.

11 Таблица 3.2

Положение точки C	$(ABC)=\lambda$	Положение точки M_4	$(M_1M_2M_3M_4)=w$
A	0	M_1	∞
Середина отрезка AB	-1	M_2	0
B	∞	M_3	1
∞	$+1$	∞	$(M_1M_2M_3)$

Интересны следующие свойства двойного отношения:

а) оно не изменяется от перестановки обеих пар точек (базисной и делящей) и от одновременной перестановки букв внутри каждой пары точек, например

$$(M_1\,M_2\,M_3\,M_4) = (M_3\,M_4\,M_1\,M_2) = w; \tag{3.91}$$

$$(M_1\,M_2\,M_3\,M_4) = (M_2\,M_1\,M_4\,M_3) = w; \tag{3.92}$$

б) изменяется на обратное при перестановке букв в одной паре точек, например

$$(M_2 M_1 M_3 M_4) = 1/w; \tag{3.93}$$

в) становится равным $(1 - w)$ при перестановке двух крайних или двух средних букв, например

$$(M_1 M_3 M_2 M_4) = (M_4 M_2 M_3 M_1) = 1 - w. \tag{3.94}$$

Может быть получено шесть различных значений двойного отношения при 24 перестановках его элементов, а именно w; $1/w$; $1 - w$; $1/(1 - w)$; $w/(w - 1)$; $(w - 1)/w$, где $1/(1 - w) = w'$, откуда $1 - w' = w/(w - 1)$. В табл. 3.3 даны 24 перестановки для различного чередования индексов 1 ... 4 при M.

Таблица 3.3

w	$1/w$	$1-w$	$1/(1-w)$	$w/(w-1)$	$(w-1)/w$
1234	1243	1324	1342	1432	1423
2143	2134	2413	2431	2341	2314
3412	3421	3142	3124	3214	3241
4321	4312	4231	4213	4123	4132

Точку M_2 удобно сделать переменной и положить $M_1M_3 = M_3M_4$. Тогда отношение отрезков $M_1M_4/M_3M_4 = 2$ и

$$(M_1 M_3 M_2 M_4) = -0{,}5M_1 M_2/M_3 M_2 = -p. \tag{3.95}$$

На рис. 3.12 показан пучок лучей из (3.95) для разных значений p, в котором точка M_2 переменна. Если на прямой заданы три фиксированные точки M_1, M_3, M_4, то положение четвертой точки M_2, удовлетворяющей заданному значению p, можно получить, накладывая рис. 3.12 на заданную плоскость, в которой лежит прямая с точками M_1, M_3, M_4, так, чтобы линия SM_1 проходила через точку M_1, линия SM_3 — через точку M_3, линия SM_4 — через точку M_4. Точка M_2 будет точкой пересечения данной прямой с линией SM_2 пучка, соответствующей заданному значению p.

Пользуясь двойным отношением четырех точек, можно на диаграмме цветностей построить сетку постоянных значений относительных яркостей из (3.64) основных цветов приемника. Пусть даны два цвета $Ц_1$ и $Ц_2$ с модулями m_1 и m_2 и цвет их смеси $Ц$, как показано на диаграмме цветностей (рис. 3.13). Из (2.271) и из рис. 3.13 следует

$$Ц_1 Ц/Ц_2 Ц = m_2/m_1; \quad y_1/y_2 = Ц_1 N/Ц_2 N, \tag{3.96}$$

где N — точка пересечения продолжения прямой $Ц_1Ц_2$ с осью $0x$.

Яркости и энергетические световые потоки (светоВт) цветов $Ц_1$ и $Ц_2$ обозначим L_1 и L_2, Φ_{V1} и Φ_{V2} соответственно, их координаты Y_1 и Y_2. Тогда

$$\Phi_{V1} = Y_1;\ \Phi_{V2} = Y_2;\ m_1 = Y_1/y_1 = \Phi_{V1}/y_1;$$

$$m_2 = Y_2/y_2 = \Phi_{V2}/y_2. \qquad (3.97)$$

Обозначив точки $Ц_1$, $Ц_2$, $Ц$, N буквами M_1, M_3, M_2, M_4 соответственно, получим двойное отношение этих четырех точек с учетом (3.95):

$$(Ц_1\, Ц_2\, ЦN) = (M_1\, M_3\, M_2\, M_4) = -\frac{M_1 M_2}{M_3 M_2} : \frac{M_1 M_4}{M_3 M_4} =$$

$$= \frac{-Ц_1 Ц}{Ц_2 Ц} : \frac{Ц_1 N}{Ц_2 N} = -p. \qquad (3.98)$$

Подставив (3.96) в (3.98), с учетом (3.97) получим

$$p = (m_2 y_2)/(m_1 y_1) = \Phi_{V2}/\Phi_{V1} = L_2/L_1 = L_2''/L_1'' = L_2'/L_1', \qquad (3.99)$$

где L_1'', L_2'', L_1', L_2' — из (3.61) и (3.64).

Наложив на рис. 3.13 пучок лучей, показанный на рис. 3.12, так, чтобы луч SM_1 проходил через точку $Ц_1$, луч SM_3 — через точку $Ц_2$ и луч SM_4 — через точку N, получим шкалу значений p на отрезке $Ц_1Ц_2$, из которой находим значение p в точке $Ц$.

Теперь рассмотрим случай, когда цвет $Ц$ образуется смесью трех основных цветов приемника, как показано на рис. 3.14. Построим прямые MN', DF', $G_пA'$. Здесь цвет $Ц$ является смесью цветов $B_п$ и M

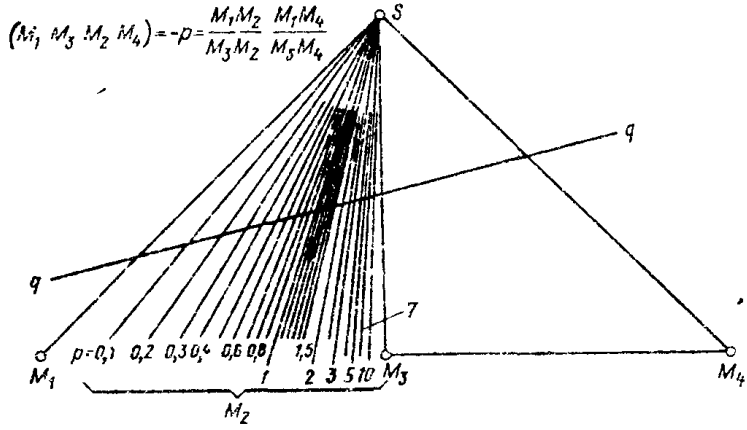


Рис. 3.12. Пучок лучей с разными значениями двойного отношения $(M_1, M_3, M_2, M_4) = -p$, причем $p = 0{,}1 \ldots 10$

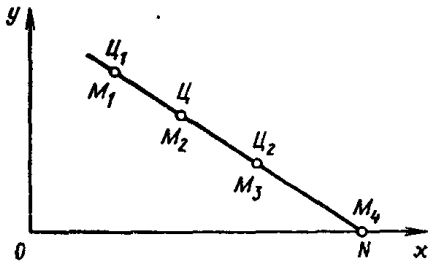


Рис. 3.13. К определению отношения яркостей цветов $Ц_1$ и $Ц_2$ в цвете $Ц$ с помощью двойного отношения четырех точек

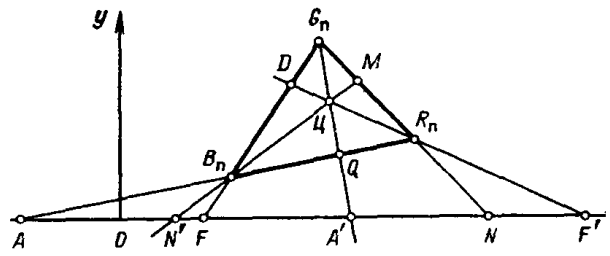


Рис. 3.14. Графическое построение к определению относительной яркости каждого основного цвета в цвете $Ц$

где цвет M имеет яркость $L_1 = L_R + L_G$, $L_2 = L_B$. По аналогии с (3.98) и (3.99) напишем двойное отношение $(MB_{п}ЦN') = -K_B$. Из (3.61), (3.64) имеем при замене L_2 на L_B

$$K_B = \frac{L_B}{L_R+L_G} = \frac{L''_B}{1+L''_G} = \frac{L''_B}{1+L''_Ц-1-L''_B} =$$

$$= \frac{L''_B}{L''_Ц-L''_B} = \frac{L'_B}{1-L'_B} = \frac{L_2}{L_1}. \qquad (3.100)$$

Аналогично можно написать

$$(DR_{п}\,ЦF') = -K_R;\ (QG_{п}\,ЦA') = -K_G, \qquad (3.101)$$

$$K_R = \frac{L_R}{L_B+L_G} = \frac{L'_R}{1-L'_R};\ K_G = \frac{L_G}{L_R+L_B} = \frac{L'_G}{1-L'_G}. \qquad (3.102)$$

Построим из точки N пучок лучей, проходящих через точки N', $B_{п}$, $Ц$, M, причем точку $Ц$ сделаем переменной, задаваясь L'_B и находя K_B из (3.100). Построим этот пучок с помощью остроугольного пучка лучей с постоянными значениями относительных яркостей L'_R или L'_G (рис. 3.15). Также построим из точки F (см. рис. 3.14) пучок лучей, проходящих через точки F', $R_{п}$, $Ц$, D, причем точку $Ц$ сделаем переменной, задаваясь L'_R и находя K_R из (3.101). Наконец, построим из точки A пучок лучей, проходящих через точки A', Q, $Ц$, $G_{п}$; точку $Ц$ сделаем переменной, задаваясь L'_G и находя K_G из (3.102). Такое построение сделано на рис. 3.16 для треугольника основных цветов приемника, на сторонах которого нанесены шкалы значений L'_B, L'_R, L'_G. Лучи с разными значениями L'_B L'_R и L'_G исходят из точек N, F и A соответственно. Буквами B_0 G_0R_0 на рис. 3.16 обозначены точки, в которых $L'_B = 0{,}5$; $L'_G = 0{,}5$; $L'_R = 0{,}5$ соответственно. Эти точки можно найти непосредственно по аналогии с точками L, M, N (см. рис. 2.23), если в точке $Ц_{р}$ поместить цвет, принятый в качестве равностимульного и равнояркостного цвета $Ц_{я}$, т. е. такой цвет, кото-

рый представляет собой смесь осиовных цветов, взятых с одинаковыми яркостями Цвет $Ц_я$ является частным случаем равностимульного цвета $Ц_р$ (см. § 3.4). Тогда точки R_0, G_0, B_0 могут являться точками пересечения прямых $R_п Ц_я$, $B_п Ц_я$, $G_п Ц_я$ со сторонами треугольника основных цветов и сетка постоянных зиачений L'_R, L'_G, L'_B совпадает с сеткой для координат $r_п$, $g_п$, $b_п$. Ось $0x$ (алихна) здесь является осью перспективы для двух треугольников $R_п G_п B_п$ и $B_0 R_0 G_0$, отвечающих теореме Дезарга (см. § 2.10). Стороны $R_п B_п$ и $G_0 B_0$; $G_п B_п$ и $G_0 B_0$; $G_п R_п$ и $G_0 B_0$ пересекаются в точках A, F, N соответственно. Заметим, что если $Ц_р$ не совпадает с $Ц_я$, то ось перспективы не совпадает с алихной.

Графическое определение равнояркостной цветности. Как указывалось выше, равнояркостный цвет $Ц_я$ — частный случай равностимульного цвета $Ц_р$. Координаты цветности равнояркостного цвета могут быть определены из (2.286) — (2.288), если принять, что $L'_R = L'_G = L'_B = 1/3$. С помощью сетки значений L'_R L'_G L'_B. На рис. 3.16 можно найти точку, в которой $L'_R = L'_G = L'_B = 1/3$, являющуюся точкой $Ц_я$. Если заданы ось перспективы (в данном случае алихна Ox) и треугольник основных цветов системы $R_п G_п B_п$, то можно не строить сетку постоянных значений L'_R, L'_G, L'_B, а найти точку $Ц_я$ тем же способом, каким определялась точка $Ц_р$ на рис. 2.23. Такое построение сделано на рис. 3.17, где проведены три прямые I, II, III, параллельиые оси перспективы (алихна Ox). Найдем точки пересечения A, F, N продолжений сторон треугольника основных цветов приемника с алихной. На прямой I находим точки $L'_G = 1$ и $L'_G = 0$ как ее точки пересечения с прямыми $AG_п$ и $AR_п$; на прямой II — точки $L'_R = 1$ и $L'_R = 0$ как точки пересечения ее с прямыми $FR_п$ и $FG_п$.

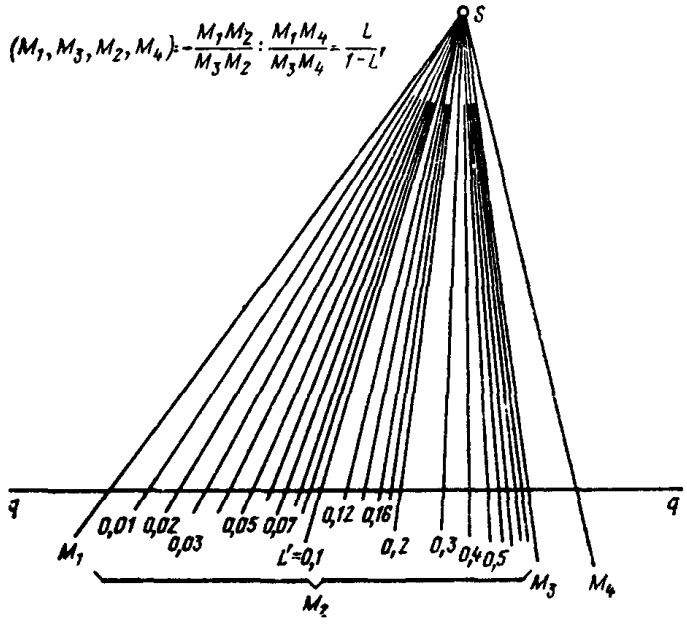


Рис. 3.15. Пучок лучей с разными значениями двойиого отиошеиия, соответствующими определеиному зиачению отиосительиой яркости L'

на прямой III — точки $L'_B = 1$ и $L'_B = 0$ как точки ее пересечения с $NB_п$ и и $NR_п$ соответственно. На прямых *I*, *II*, *III* строим равномерные шкалы.

Затем точки 0,5 на прямых *I*, *II*, *III* соединяем прямыми с точками *A*, *F*, *N* соответственно и находим точки *L*, *M*, *Q* на сторонах треугольника $R_пG_пB_п$. Соединяя точки *L*, *M*, *Q* с вершинами этого треугольника находим точку их пересечения, т. е. точку равнояркостного цвета $Ц_п$ ($x = 0{,}240$; $y = 0{,}180$, что близко к расчетным значениям, полученным в § 3.4 аналитическим методом).

Можно решить и обратную задачу — построить алихну, если на плоскости заданы треугольник $R_пG_пB_п$ и точка равнояркостного цвета $Ц_я$, совпадающего с $Ц_р$. Для этого следует построить ось перспективы, аналогично тому, как это показано на рис. 2.23, заменить букву $Ц_р$ на $Ц_я$. Полученная таким образом ось перспективы и будет алихной.

Графическое определение максимально возможных значений яркостей основных цветов приемника. Рассмотрим случай, когда необходимо воспроизвести цвета, создаваемые оптимальными фильтрами (см. § 2.23).

Нанесем на рис. 3.14 контуры постоянных значений светлоты $\beta_{макс}$, взятых соответственно из рис. 2.70—2.72, в зависимости от того, какой применен источник освещения оптимального фильтра. Определим точ-

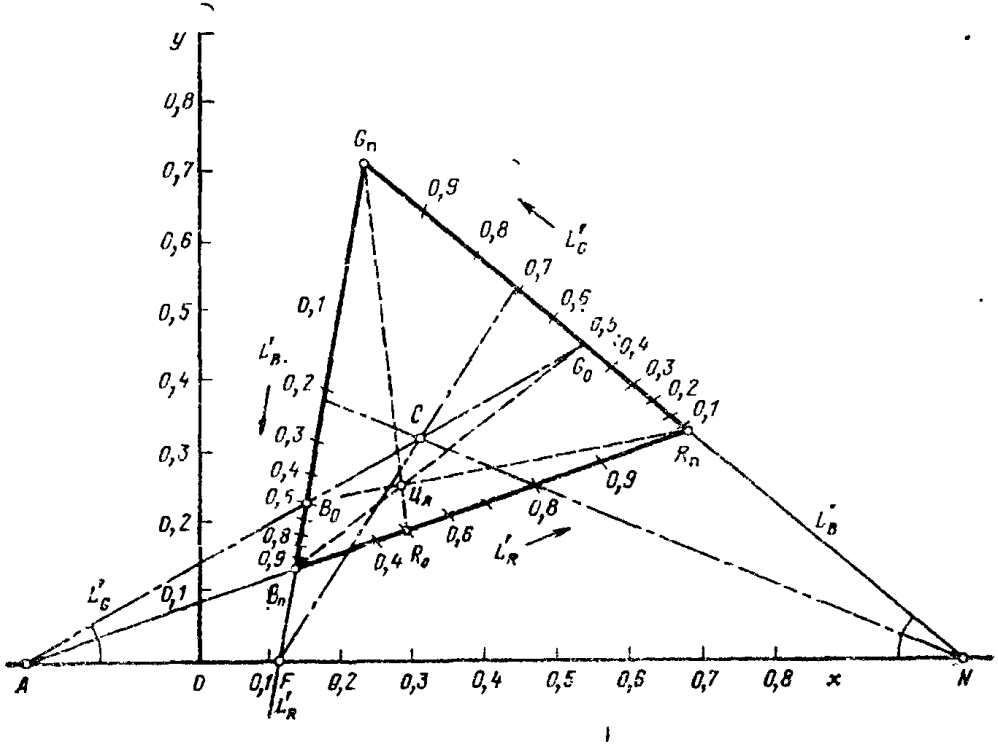


Рис. 3.16. Графические построения к определению равнояркостного цвета $Ц_я$ смеси основных цветов приемника, имеющих одинаковые яркости, и относительных яркостей этих цветов при получении белого *C*

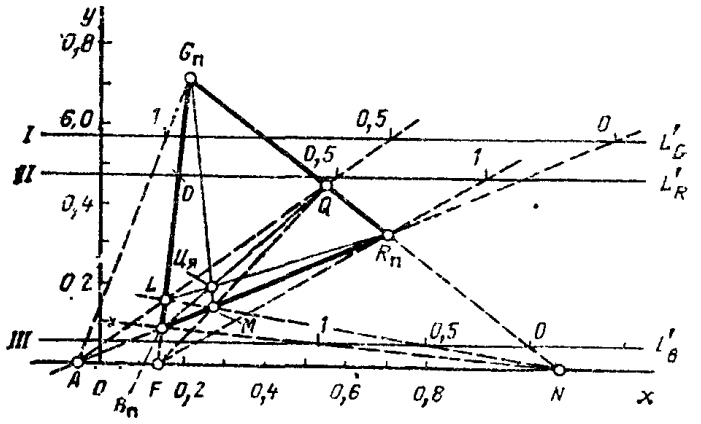


Рис. 3.17. Графическое построение сетки постоянных значений относительных яркостей основных цветов приемника NTSC (см. табл. 3.4)

ки, в которых $L'_R\beta_{макс} = a$ постоянно, и построим контуры, соответствующие различным значениям a.

Аналогично можно построить контуры для различных значений $b = L'_G\beta_{макс}$ и $c = L'_B\beta_{макс}$. Найдем наибольшие их значения: $a = a_{макс}$; $b = b_{макс}$; $c = c_{макс}$, и вычислим отношения $a_{макс}/L'_{Ro}$; $b_{макс}/L'_{Go}$; $c_{макс}/L'_{Bo}$, где L'_{Ro}, L'_{Go}, L'_{Bo} — относительные яркости основных цветов приемника, необходимые для создания цветности источника, освещающего оптимальный фильтр, для которой $\beta_{макс} = 1$. Может оказаться, что для некоторых цветностей эти отношения будут больше единицы. Это означает, что для получения таких цветностей необходимо, чтобы яркость соответствующего основного цвета приемника была больше яркости, необходимой для получения цветности указанного источника света. Однако в практике это обычно не имеет места, так как для реальных цветов $\beta_{макс}$ меньше, чем для идеальных фильтров.

3.6. ГАММА ВОСПРОИЗВОДИМЫХ ЦВЕТОВ В ПРИЕМНИКЕ

Цветовоспроизводящее устройство (например, цветной телевизор) имеющее основные цвета $R_п$, $G_п$, $B_п$, может создавать только цвета, представленные на диаграмме цветностей внутри цветового треугольника $R_пG_пB_п$. Цвета, расположенные вне этого треугольника, оно создавать не может и воспроизводит с искажениями. Поэтому для хорошей цветопередачи треугольник $R_пG_пB_п$ должен охватывать наибольшую гамму цветов [25, 26, 108, 109].

На диаграммах цветности xy (система XYZ МКО—1931 г.) и uv (систем UVW МКО — 1960 г.) (рис. 3.18 и 3.19) представлена гамма цветов, воспроизводимых в цветной фотографии (область внутри многоугольника ЦКП). Как видно из рис. 3.19, данный контур цветов красителей ЦКП не охватывает высоконасыщенные зеленые, голубые, синие и пурпурные цвета, а также красные цвета в области 610 ... 700 нм (площадь, охваченная контуром ЦКП, составляет примерно 40 % пло-

щади, ограниченной на диаграмме *uv* локусами спектральных и пурпурных цветов).

Чтобы воспроизвести в цветном телевидении наибольшее количество различных цветностей, треугольник основных цветов приемника должен удовлетворять следующим требованиям:

1) охватывать контур ЦКП при всех видах освещения, так как в цветном телевидении необходимо воспроизводить цвета тканей, декораций, цветные фотографии и кинофильмы, картины, плакаты, иллюстрации и т. д., в которых применены современные красители и краски (включая люминесцентные);

2) охватывать гамму цветов в частности, при внестудийных передачах встречающихся в природе (цветы, трава, листва, небо, вода и т.д.);

3) обеспечивать получение высокой яркости изображения при сравнительно небольшой затрате мощности на излучение основных цветов, т. е. основные цвета приемника должны иметь большую яркость при высокой их насыщенности.

Рассмотрим последнее требование подробнее. С расширением треугольника $R_{\text{п}}G_{\text{п}}B_{\text{п}}$ при данной мощности излучения люминофоров труднее получить достаточную яркость изображения, так как основные его цвета приближаются к цветам спектрального локуса (т. е. спектр излучения становится менее широким), становясь более насыщенными. Повысить яркость можно в этом случае только увеличением мощности излучения (при использовании в качестве источников основных цветов приемника лазеров это реализуется легче, чем при использовании люминофоров).

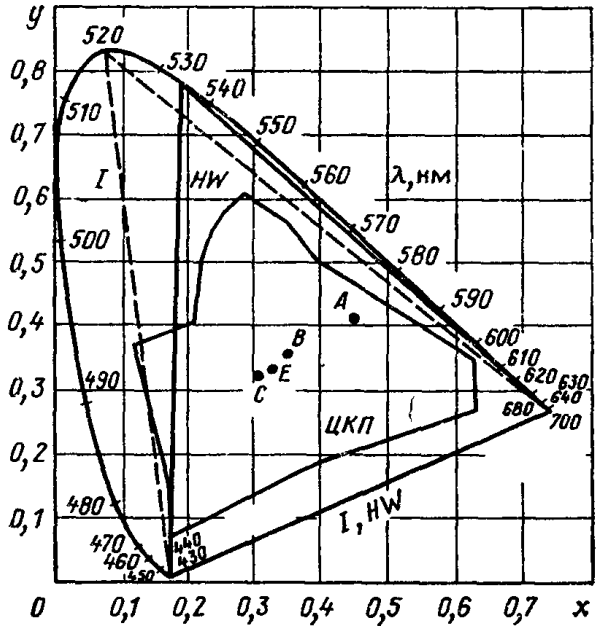


Рис. 3.18. Треугольники основных цветов приемников HW и I; контур ЦКП, охватывающий цвета, воспроизводимые на кинопленке (диаграмма *x*, *y* МКО — 1931 г.)

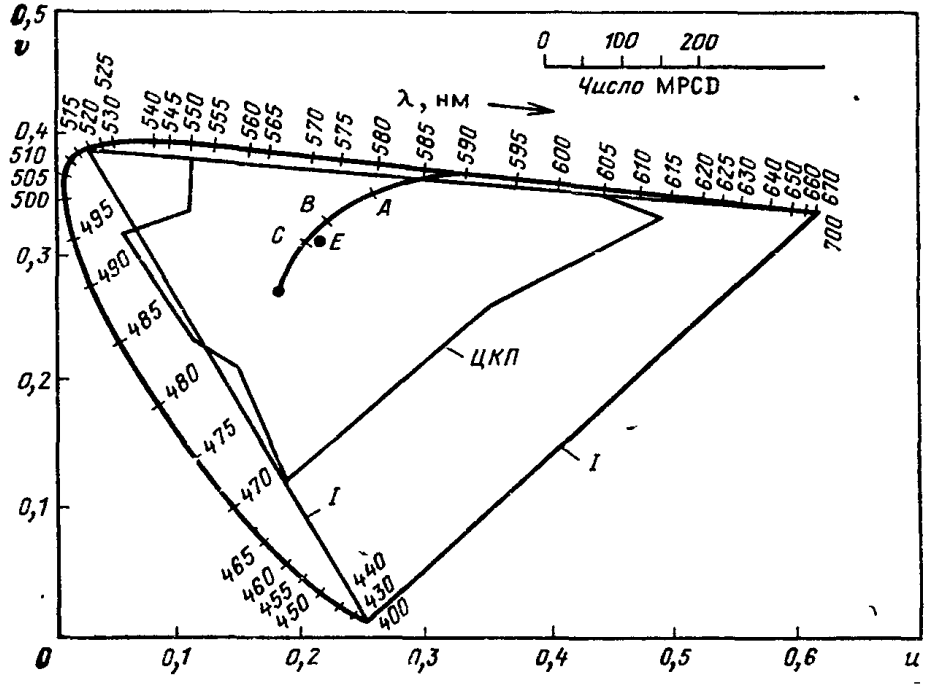


Рис. 3.19. Треугольник основных цветов приемника *I* и контур ЦКП наиболее насыщенных цветов кинопленки на равноконтрастной диаграмме *u*, *v* МКО — 1960 г.

Для получения достаточной яркости цветов, близких к цветам концов спектрального локуса (красный и синий), увеличить мощности излучения цветов $R_{\text{п}}$ и $B_{\text{п}}$ необходимо также и потому, что относительная видность v_λ крайних спектральных цветов мала (см. табл. 1.2). Из рис. 2.72 видно, что красный цвет оптимальных красителей, близкий к спектральному, с длиной волны 610 ... 620 нм имеет большую насыщенность при сравнительно большой яркости. В этой области реальные красители близки к оптимальным. Поэтому в качестве основного цвета приемника $R_{\text{п}}$ (красного) не следует брать спектральный цвет с длиной волны более 620 нм. Насыщенные оранжевые и желтые цвета на длинах волн 605 ... 650 нм имеют большую яркость. Это верно не только для оптимальных, но и для реальных красителей. Таким образом, сторона треугольника, соединяющая красный и зеленый основные цвета $R_{\text{п}}$, $G_{\text{п}}$, должна, по возможности, приближаться к спектральному локусу на участке этих длин волн, чтобы часто встречающиеся насыщенные красные, оранжевые и желтые цвета воспроизводились с большой яркостью без потери насыщенности.

Зеленые цвета имеют широкий спектр излучения, их насыщенность мала, а яркость велика. Поэтому основной зеленый цвет $G_{\text{п}}$ не должен быть близок к спектральному локусу. Для получения белого цвета яркость зеленого цвета $G_{\text{п}}$ в смеси основных цветов приемника должна в

5 ... 10 раз превышать яркость основного синего цвета $B_{\text{п}}$ (близкого к спектральному с длиной волны 450 ... 470 нм). Следовательно, очень важно получать основной зеленый цвет с большой яркостью, для чего его следует выбирать не очень насыщенным, особенно при укорочении преобладающей длины волны. Как видно из рис. 2.72, высоконасыщенные голубые цвета имеют малую яркость и встречаются редко. Обычно голубые цвета имеют широкий спектр излучения, и поэтому их яркость велика, а насыщенность мала. Это позволяет значительно удалять от спектрального локуса сторону треугольника, соединяющую основные зеленый $G_{\text{п}}$ и синий $B_{\text{п}}$ цвета. Кроме того, из этого рисунка следует, что яркость насыщенных синих (470 ... 430 нм) и фиолетовых (430 ... 380 нм) цветов мала, причем на волнах короче 470 нм при данной насыщенности яркость мало зависит от длины волны. Для получения широкой гаммы цветов синий основной цвет $B_{\text{п}}$ выбирают высоконасыщенным вблизи спектрального локуса в области 450 ... 470 нм. Для оптимальной цветопередачи (с точки зрения цветового охвата) следует выбирать основные цвета приемника на спектральном локусе.

В табл. 3.4 даны координаты цветности ряда треугольников таких цветов. На рис. 3.18 такой треугольник обозначен HW (предложен в 1937 г. Харди и Вурцбургом [107]) его вершинами являются спектральные цвета с длинами волн 700, 535 и 400 нм. Площадь этого треугольник

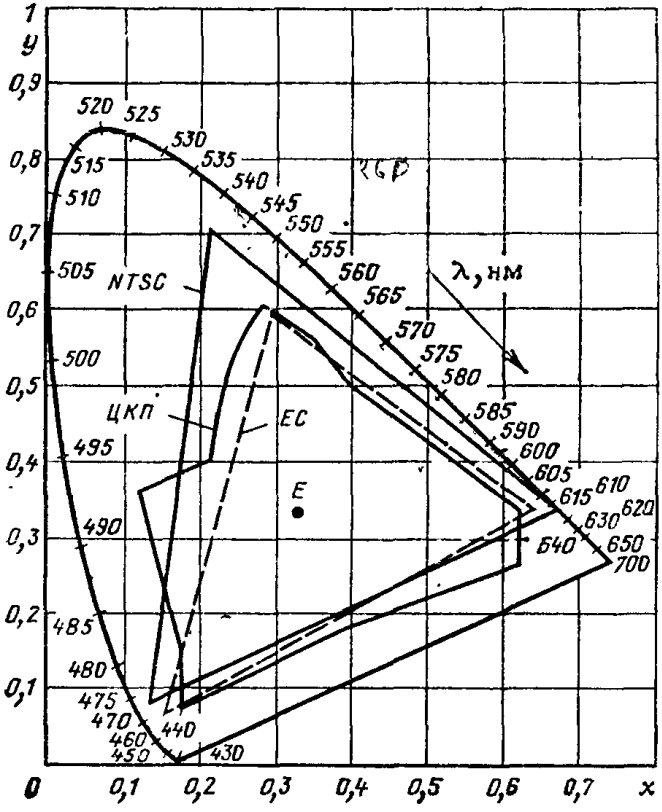


Рис. 3.20. Треугольники основных цветов приемников NTSC и EC

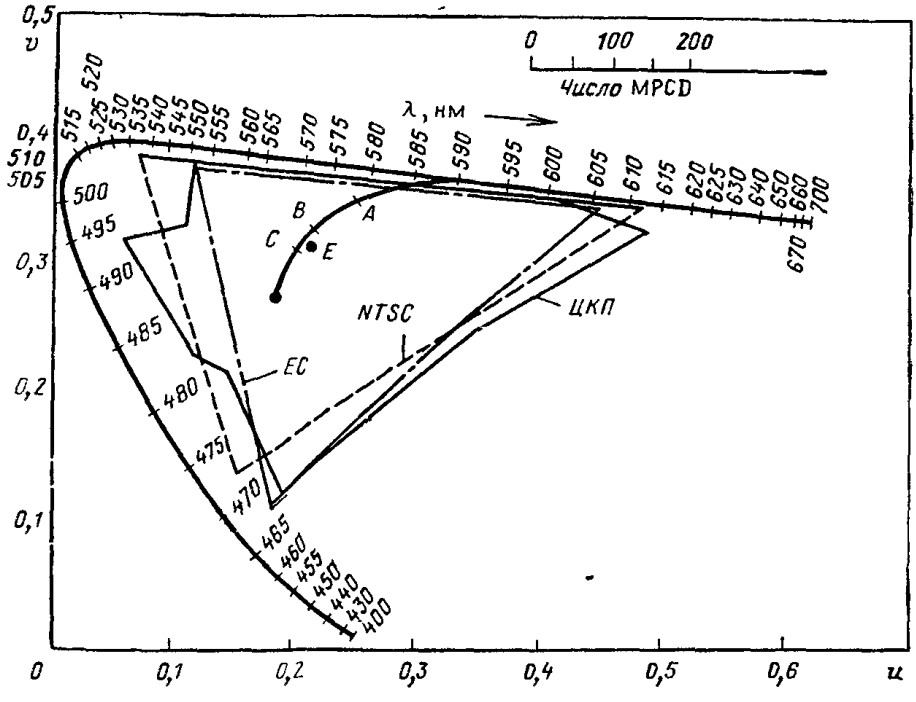


Рис. 3.21. Треугольники основных цветов приемников NTSC и EC на равноконтрастной диаграмме МКО – 1960 г.

ника на равноконтрастной диаграмме *uv* МКО — 1960 г. не является наибольшей возможной. Для охвата наибольшей площади в 1953 г. автором был предложен треугольник основных цветов, обозначенный буквой *I*, который назовем идеальным. Такой треугольник *I* показан на рис. 3.18 и 3.19. Излучение люминофоров цветных кинескопов занимает некоторый спектр, поэтому цвет их свечения менее насыщен, чем спектральный, что уменьшает гамму воспроизводимых ими цветов. Треугольник F образован цветами $R_п$, $G_п$, $B_п$, менее насыщенными, чем спектральные, и хорошо охватывает контур цветов современных красителей ЦКП. Для улучшения воспроизведения красных и пурпурных цветов может быть применен треугольник F' (треугольники F и F' предложены автором также в 1953 г.).

В настоящее время в цветном телевидении повсеместно приняты два треугольника основных цветов приемника, обозначенные в табл. 3.4 как треугольники NTSC и EC, показанные на рис. 3.20 и 3.21. Треугольник NTSC был предложен в 1953 г. (США) и является теоретическим, применяется [1] при кодировании сигналов цветного телевидения в системах NTSC, PAL, СЕКАМ для образования сигнала яркости E'_Y и цветоразностных сигналов E'_{R-Y} и E'_{B-Y}. Он охватывает большую гамму цветов и обеспечивает высокую яркость изображения.

[1] Это сложилось исторически.

Современные люминофоры не создают его основные цвета, поэтому для реальных кинескопов в СССР приняты основные цвета $R_п$, $G_п$, $B_п$, рекомендованные в 1970 г. в качестве Европейского Стандарта (табл. 3.4, треугольник ЕС), являющиеся разумным компромиссом между технико-экономическими возможностями и психофизическими потребностями нашего зрения.

Таблица 3.4

Треугольник основных цветов	Координаты цветности основных цветов						$L''_B : L''_R : L''_G$	$Ц_р$
	$R_п$		$G_п$		$B_п$			
	x	y	x	y	x	y		
HW	0,735	0,265	0,163	0,782	0,174	0,005	1:27,6:110	C
I	0,735	0,265	0,070	0,830	0,174	0,005	1:37,2:110	C
F	0,675	0,320	0,160	0,770	0,150	0,040	1:4,3:10	C
F'	0,735	0,265	0,160	0,770	0,150	0,050	1:3,5:10,7	C
NTSC	0,670	0,330	0,210	0,710	0,140	0,080	1:2,61:5:5,12	C
ЕС*	0,640	0,330	0,290	0,600	0,150	0,060	1:3,12:9,91	D_{65}

* Стандарт СССР

Значения относительных яркостей основных цветов приемника L''_B, L''_R, L''_G на равностимульном (для данного треугольника) цвете $Ц_р$ вычислены с помощью (3.56). Треугольник ЕС был принят в СССР как стандарт в 1974 г. (ГОСТ 194 32—74, ГОСТ 7845—79). Если обозначить $L'_R = \alpha$, $L'_G = \beta$, $L'_B = \delta$, где $L'_R = L_R/L_ц$; $L'_G = L_G/L_ц$; $L'_B = L_B/L_ц$ и $L_Ц = L_R + L_G + L_B$, то, пользуясь (3.56), найдем для треугольника NTSC при стандартном белом C в качестве $Ц_р$ $\alpha = 0{,}29890$; $\beta = 0{,}58662$; $\delta = 0{,}11448$, как это было дано (3.57). Для треугольника ЕС и белого D_{65} в качестве $Ц_р$ получим по (3.56) $\alpha = 0{,}22271$; $\beta = 0{,}70602$; $\delta = 0{,}07127$, как это было дано (3.58).

В Приложении сделаны основные колориметрические расчеты для систем цветного телевидения с треугольниками основных цветов NTSC и ЕС. В табл. 3.5 даны координаты цветности u, v в системе UVW МКО—1960 г. для этих треугольников.

Таблица 3.5

Основной цвет	Треугольник NTSC		Треугольник ЕС	
	u	v	u	v
$R_п$	0,477	0,352	0,451	0,349
$G_п$	0,076	0,384	0,121	0,374
$B_п$	0,152	0,130	0,175	0,105

Для белого цвета C имеем $u = 0{,}201$, $v = 0{,}307$; для белого цвета D_{65} : $u = 0{,}198$, $v = 0{,}312$.

Треугольник ЕС применяют для определения спектральных характеристик передающей камеры цветного телевидения и для установки в приемнике баланса белого цвета D_{65}.

Для получения высокой колориметрической точности цветовоспроизведения значения координат основных цветов приемника во всех действующих приемниках должны быть близкими к номинальным, указанным в табл. 3.4. Европейским союзом радиовещания в качестве областей допусков на координаты цветности основных цветов приемника ЕС рекомендуется применять четырехугольники с вершинами, координаты которых указаны в табл. 3.6 и 3.7; кроме того, необходимо, чтобы ошибка при воспроизведении испытательных телесных цветов не превышала 0,003 на равноконтрастной диаграмме цветностей u, v МКО — 1960 г. (длина отрезка между точками на этой диаграмме, представляющими цветности оригинала и изображения).

Таблица 3.6

Основной цвет	Координата x, y вершин четырехугольника			
$R_П$	(0,654; 0,332)	(0,640; 0,319)	(0,608; 0,322)	(0,637; 0,349)
$G_П$	(0,320; 0,605)	(0,286; 0,542)	(0,280; 0,610)	(0,298; 0,627)
$B_П$	(0,158; 0,060)	(0,150; 0,053)	(0,143; 0,061)	(0,154; 0,072)

Таблица 3.7

Основной цвет	Координата u, v вершин четырехугольника			
$R_П$	(0,461; 0,351)	(0,461; 0,345)	(0,431; 0,342)	(0,431; 0,354)
$G_П$	(0,133; 0,377)	(0,128; 0,363)	(0,115; 0,375)	(0,120; 0,379)
$B_П$	(0,186; 0,106)	(0,180; 0,095)	(0,166; 0,106)	(0,173; 0,122)

При допусках на отклонения основных цветов от номинальных, указаиных в табл. 3.6 и 3.7, ошибки цветопередачи на равноконтрастной диаграмме u, v не превышают 60 MPCD, т. е. 6 СЦП (при правильных спектральных характеристиках передающей камеры).

Основные цвета приемников, приведенные в табл. 3.4, предназначены для применения главным образом в одновременных системах цветного телевидения, в которых сигнал яркости передается с таким же стандартом развертки, как и в черно-белом телевидении (частота полей 50 Гц), так что частота мерцания яркости крупных участков изображения 50 Гц. В этих условиях отношения яркостей L'_B, L'_R, L_G, данные в табл. 3.4, являются допустимыми.

В системах цветного телевидения *с поочередной передачей цветовых полей*, применяемой в прикладном телевидении, важно, чтобы при создании белого цвета яркости основных цветов были примерно одинаковыми, во избежание заметности мерцаний яркости. Основные цвета треугольников NTSC и ЕС (табл. 3.4) для такой системы не вполне при-

годны, так как их яркости на белом различаются значительно. Поэтому в системе с поочередной передачей цветовых полей иногда применяют треугольники основных цветов приемников A и E. В табл. 3.8 приведены данные для этих треугольников.

Таблица 3.8

Треугольник	Координаты цветности основных цветов						$l''_B : l''_R : l''_G$	U_p
	$R_п$		$G_п$		$B_п$			
	x	y	x	y	x	y		
A	0,675	0,325	0,221	0,712	0,130	0,130	1:1,5:2,4	C
E	0,674	0,326	0,227	0,694	0,122	0,142	1:1,8:2,9	C

На рис. 3.22 сетка координат цветности $r_п$, $g_п$, $b_п$ построена в соответствии с рис. 2.23. Положение оси перспективы зависит от выбора цвета $Ц_р$ и основных цветов приемника. Такое же построение можно сделать, пользуясь формулами перехода (см. (П. 64)).

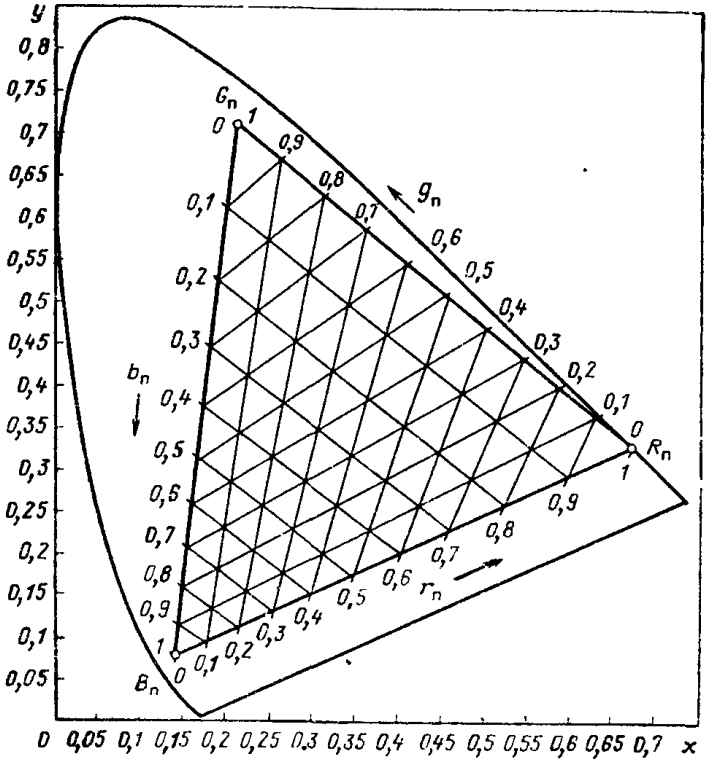


Рис. 3.22. Сетка трилинейных координат для основных цветов приемника NTSC при выборе в качестве равностимульного цвета белого C

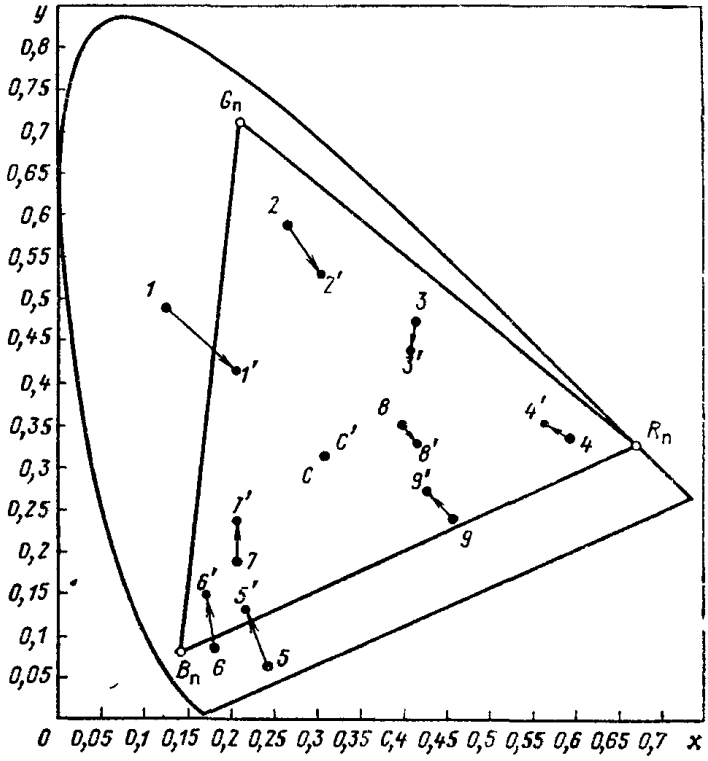


Рис. 3.23. Графическое представление искажений цветопередачи по данным табл. 3.10 при неискаженном воспроизведении контрольного цвета белого *C*

3.7. РАСЧЕТ ВЕРНОСТИ ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ В ЦВЕТНОМ ТЕЛЕВИДЕНИИ

Общие положения. Для расчета координат цветности изображения в приемнике необходимо знать спектральное распределение мощности в излучении P_λ оригинала и реальные спектральные характеристики передающей камеры, которые обозначим $\bar{r}'_\text{п}$, $\bar{g}'_\text{п}$, $\bar{b}'_\text{п}$ в отличие от идеальных $\bar{r}_\text{п}$, $\bar{g}_\text{п}$, $\bar{b}_\text{п}$ (3.19), обеспечивающих колориметрически правильную цветопередачу. Если $R_\text{п}$, $G_\text{п}$, $B_\text{п}$ — основные цвета приемника, то координаты цвета оригинала $Ц_0$ в соответствии с (3.16) в системе основных цветов приемника:

$$R_{\text{п.о}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{r}_\text{п} P_\lambda \, d\lambda; \quad G_{\text{п.о}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{g}_\text{п} P_\lambda \, d\lambda;$$

$$B_{\text{п.о}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{b}_\text{п} P_\lambda \, d\lambda, \qquad (3.103)$$

где удельные координаты $\bar{r}_\text{п}$, $\bar{g}_\text{п}$, $\bar{b}_\text{п}$ в системе $R_\text{п}G_\text{п}B_\text{п}$ определяются матрицей $\tilde{A}_0$ из (2.191), если подставить $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ вместо R, G, B и $\bar{r}_\text{п}$, $\bar{g}_\text{п}$, $\bar{b}_\text{п}$ вместо X, Y, Z. Для основных цветов приемника NTSC при бе-

лом цвете C в качестве равностимульного элемента матрицы $\widetilde{A}_0$ рассчитаны в Приложении (см. (П.49)); для основных цветов приемника ЕС при белом цвете D_{65} в качестве равностимульного, элементы матрицы $\widetilde{A}_0$ — в конце приложения. Координаты цветности $r_{п\cdot0}$, $r_{п\cdot0}$, $g_{п\cdot0}$, $b_{п\cdot0}$ цвета оригинала $Ц_0$ рассчитывают по координатам цвета $R_{п\cdot0}$, $G_{п\cdot0}$, $B_{п\,0}$ и формулам, аналогичным (2.251). Определенная таким образом цветность может быть представлена точкой на диаграмме цветностей (рис. 3.22). Эту точку можно также определить, находя X_0, Y_0, Z_0 для $Ц_0$ по (2.255) и далее находя x_0, y_0, z_0 по (2.251).

Если передающая камера имеет спектральные характеристики, $\bar{r}_п$, $\bar{g}_п$, $\bar{b}_п$ в соответствии с (3.18), т. е. идеальные характеристики и если координаты цвета изображения в системе $R_пG_пB_п$ будут $R_{п.и} = kR_{п.0}$; $G_{п.и} = kG_{п.0}$; $B_{п\cdot и} = kB_{п.0}$ в соответствии с (3.7) и (3.9), то цветопередача будет колориметрически верной. При этом тракт передачи от передаваемой сцены до изображения не должен вносить нелинейных искажений, т. е. он должен быть линейным для соблюдения условия (3.11). Если известны $R_{п\cdot и}$, $G_{п\cdot и}$, $B_{п\cdot и}$, то можно найти координаты цвета изображения $X_и$, $Y_и$, $Z_и$ по (2.192), подставив в нее $R_{п\cdot и}$, $G_{п.и}$, $B_{п\cdot и}$ вместо X, Y, Z и $X_и$, $Y_и$, $Z_и$ вместо R, G, B и используя в качестве элементов матрицы $\widetilde{A}_0^{-1}$ из (2.189). Числовые значения этих элементов даны в формулах (П. 50), в которые вместо $R_п$, $G_п$, $B_п$ нужно подставить $R_{п\cdot и}$, $G_{п\cdot и}$, $B_{п\cdot и}$ и вместо X, Y, Z — $X_и$, $Y_и$, $Z_и$. Подставив $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ вместо X, Y, Z в формулах (П.49), получим идеальные спектральные характеристики передающей камеры $\bar{r}_п$, $\bar{g}_п$, $\bar{b}_п$.

Если реальные характеристики передающей камеры обозначить $\bar{r}'_п$, $\bar{g}'_п$, $\bar{b}'_п$, то, подставив их в (3.103) вместо $\bar{r}_п$, $\bar{g}_п$, $\bar{b}_п$, получим координаты цвета изображения (если тракт линейный, т. е. $\gamma_{п.т\,i} = \gamma_{гк\,i} = \gamma_{к\,i} = 1$):

$$R'_{п.и} = k\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{r}'_п P_\lambda\, d\lambda;\quad G'_{п.и} = k\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{g}'_п P_\lambda\, d\lambda;$$

$$B'_{п\,и} = k\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{b}'_п P_\lambda\, d\lambda, \qquad (3.104)$$

где k — коэффициент из (3.9).

Для этого случая можно найти координаты цвета изображения в системе XYZ МКО — 1931 г., обозначив их $X'_и$, $Y'_и$, $Z'_и$, для чего элементы матрицы $\widetilde{A}_0^{-1}$ из (П.46) подставим в (П.48) и получим

$$X = (R'_{п(X)} R_п + R'_{п(Y)} G_п + R'_{п(Z)} B_п)/A';$$
$$Y = (G'_{п(X)} R_п + G'_{п(Y)} G_п + G'_{п(Z)} B_п)/A';$$
$$Z = (B'_{п(X)} R_п + B'_{п(Y)} G_п + B'_{п(Z)} B_п)/A'. \qquad (3.105)$$

Подставив в (3.105) $\bar{r}'_{\text{п}}$, $\bar{g}'_{\text{п}}$, $\bar{b}'_{\text{п}}$ вместо $R_{\text{п}}$, $G_{\text{п}}$, $B_{\text{п}}$, соответственно, получим

$$\bar{x}' = (R'_{\text{п}(X)}\,\bar{r}'_{\text{п}} + R'_{\text{п}(Y)}\,\bar{g}'_{\text{п}} + R'_{\text{п}(Z)}\,\bar{b}'_{\text{п}})/A';$$
$$\bar{y}' = (G'_{\text{п}(X)}\,\bar{r}'_{\text{п}} + G'_{\text{п}(Y)}\,\bar{g}'_{\text{п}} + G'_{\text{п}(Z)}\,\bar{b}'_{\text{п}})/A';$$
$$\bar{z}' = (B'_{\text{п}(\lambda)}\,\bar{r}'_{\text{п}} + B'_{\text{п}(Y)}\,g'_{\text{п}} + B'_{\text{п}(Z)}\,\bar{b}'_{\text{п}})/A'. \qquad (3.106)$$

Подставив (3.106) в (2.255), получим при спектральных характеристиках камеры $\bar{r}'_{\text{п}}$, $\bar{g}'_{\text{п}}$, $\bar{b}'_{\text{п}}$ и линейном тракте передачи координаты цвета изображения

$$X'_{\text{и}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{x}'\,P_\lambda\,d\lambda = (1/A')\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (R'_{\text{п}(X)}\,\bar{r}'_{\text{п}} + R'_{\text{п}(Y)}\,\bar{g}'_{\text{п}} + R'_{\text{п}(Z)}\,\bar{b}'_{\text{п}})\,d\lambda;$$
$$Y'_{\text{и}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{y}'\,P_\lambda\,d\lambda = (1/A')\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (G'_{\text{п}(X)}\,\bar{r}'_{\text{п}} + G'_{\text{п}(Y)}\,\bar{g}'_{\text{п}} + G'_{\text{п}(Z)}\,\bar{b}'_{\text{п}})\,d\lambda;$$
$$Z'_{\text{и}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{z}'\,P_\lambda\,d\lambda = (1/A')\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (B'_{\text{п}(X)}\,\bar{r}'_{\text{п}} + B'_{\text{п}(Y)}\,\bar{g}'_{\text{п}} + B'_{\text{п}(Z)}\,\bar{b}'_{\text{п}})\,d\lambda. \qquad (3.107)$$

Численные значения произведений $(1/A')$ на члены подынтегральных выражений даны в формулах (П.50). Аналогично (2.251) определяем координаты цветности изображения $r'_{\text{п.и}}$, $g'_{\text{п.и}}$, $b'_{\text{п.и}}$ из (3.104) и $x'_{\text{и}}$, $y'_{\text{и}}$, $z'_{\text{и}}$, из (3.107). На диаграмме цветностей эти координаты определяют точку, представляющую цветность изображения *Ци*, которая не совпадает с точкой $Ц_0$ (цветность оригинала). Величина и направление отрезка $Ц_0Ц_{\text{и}}$ характеризуют искажения цветопередачи. Если этот отрезок построен на равноконтрастной диаграмме (см. рис. 2.61), то его длина может быть измерена числом цветовых порогов. В рассмотрением здесь общем случае искажаются все цвета.

Расчет верности цветопередачи при неискаженном воспроизведений контрольной цветности *Цк*. Яркости единичных количеств основных цветов приемника обозначим $L_{[R]}$, $L_{[G]}$, $L_{[B]}$, координаты цвета единичных количеств основных цветов приемника в системе *XYZ*: $X_{[R]}$, $Y_{[R]}$, $Z_{[R]}$, $X_{[G]}$, $Y_{[G]}$, $Z_{[G]}$, $X_{[B]}$, $Y_{[B]}$, $Z_{[B]}$. Из (3.47) для цвета $Ц_{\text{и}}$, для которого яркости основных цветов приемника $L_{R\text{и}}$, $L_{G\text{и}}$, $L_{B\text{и}}$, имеем координаты цвета в системе XYZ:

$$X_{\text{и}} = X_{R\text{и}} + X_{G\text{и}} + X_{B\text{и}} = \frac{L_{R\text{и}}}{L_{[R]}}\,X_{[R]} + \frac{L_{G\text{и}}}{L_{[G]}}\,X_{[G]} + \frac{L_{B\text{и}}}{L_{[B]}}\,X_{[B]};$$
$$Y_{\text{и}} = Y_{R\text{и}} + Y_{G\text{и}} + Y_{B\text{и}} = \frac{L_{R\text{и}}}{L_{[R]}}\,Y_{[R]} + \frac{L_{G\text{и}}}{L_{[G]}}\,Y_{[G]} + \frac{L_{B\text{и}}}{L_{[B]}}\,Y_{[B]};$$
$$Z_{\text{и}} = Z_{R\text{и}} + Z_{G\text{и}} + Z_{B\text{и}} = \frac{L_{R\text{и}}}{L_{[R]}}\,Z_{[R]} + \frac{L_{G\text{и}}}{L_{[G]}}\,Z_{[G]} + \frac{L_{B\text{и}}}{L_{[B]}}\,Z_{[B]}, \qquad (3.108)$$

где X, Y, Z с индексами $R_и$, $G_и$, $B_и$, — координаты цвета, (т. е. количества) основных цветов приемника в изображении в системе X YZ.

Из (2.251) получим $X_{[R]} = m_{[R]}x_R$; $Y_{[R]} = m_{[R]}y_R$; $Z_{[R]} = m_{[R]}z_R$ (аналогично для X, Y, Z с индексами $[G]$ и $[B]$); подставив эти выражения в (3.108), получим:

$$X_и = ax_R + bx_G + cx_B;\quad Y_и = ay_R + by_G + cy_B;$$

$$Z_и = az_R + bz_G + cz_B;\quad a = (m_{[R]}/L_{[R]})\,L_{Rи};$$

$$b = (m_{[G]}/L_{[G]})\,L_{Gи};\quad c = (m_{[B]}/L_{[B]})\,L_{Bи}, \tag{3.109}$$

где $m_{[R]} = X_{[R]} + Y_{[R]} + Z_{[R]}$; $m_{[G]} = X_{[G]} + Y_{[G]} + Z_{[G]}$;

$$m_{[B]} = X_{[B]} + Y_{[B]} + Z_{[B]}. \tag{3.110}$$

Обычно требуется, чтобы некоторая *контрольная цветность* $Ц_к$ воспроизводилась без искажений. Если $P_{\lambda к}$ — спектральное распределение мощности источника, создающего цветность $Ц_к$, то для этой цветности координаты цвета

$$X_к = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{x}P_{\lambda к}\,d\lambda;\quad Y_к = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{y}P_{\lambda к}\,d\lambda;\quad Z_к = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{z}P_{\lambda к}\,d\lambda. \tag{3.111}$$

Для неискаженного воспроизведения контрольной цветности $Ц_к$ необходимо вместо $X_и$, $Y_и$, $Z_и$ в (3.109) подставить $X_к$, $Y_к$, $Z_к$ и заменить $L_{Rи}$, $L_{Gи}$, $L_{Bи}$ на $L_{Rк}$, $L_{Gк}$, $L_{Bк}$ (где $L_{Rк}$, $L_{Gк}$, $L_{Bк}$ яркости основных цветов приемника при воспроизведении контрольной цветности $Ц_к$). Таким образом, получим

$$X_к = a_1 x_R + b_1 x_G + c_1 x_B;\quad Y_к = a_1 y_R + b_1 y_G + c_1 y_B;$$

$$Z_к = a_1 z_R + b_1 z_G + c_1 z_B;\quad a_1 = (m_{[R]}/L_{[R]})\,L_{Rк};$$

$$b_1 = (m_{[G]}/L_{[G]})\,L_{Gк};\quad c_1 = (m_{[B]}/L_{[B]})\,L_{Bк}, \tag{3.112}$$

где

$$X_к = m_к x_к;\quad Y_к = m_к y_к;\quad Z_к = m_к z_к; \tag{3.113}$$

$$m_к = X_к + Y_к + Z_к. \tag{3.114}$$

Здесь $x_к$, $y_к$, $z_к$ — координаты цветности цвета $Ц_к$.

Если известны $L_{Rк}$, $L_{Gк}$, $L_{Bк}$, используя (3.113), с помощью (2.74) и (2.75) найдем из (3.112):

$$m_{[R]}/L_{[R]} = (m_к/D)\,L_{Bк}\,L_{Gк}\,A_1;\quad m_{[G]}/L_{[G]} = (m_к/D)\,L_{Bк}\,L_{Rк}\,A_2;$$

$$m_{[B]}/L_{[B]} = (m_к/D)\,L_{Rк}\,L_{Gк}\,A_3, \tag{3.115}$$

$$D = L_{Rк}\,L_{Gк}\,L_{Bк}(x_R\,y_G\,z_B + y_R\,z_G\,x_B + z_R\,x_G\,y_B - x_R\,z_G\,y_B - y_R\,x_G\,z_B - z_R\,y_G\,x_B), \tag{3.116}$$

$$A_1 = (y_G\,z_B - y_B\,z_G)\,x_к + (x_B\,z_G - x_G\,z_B)\,y_к + (x_G\,y_B - x_B\,y_G)\,z_к;$$

$$A_2 = (y_B\,z_R - y_R\,z_B)\,x_к + (x_R\,z_B - x_B\,z_R)\,y_к + (x_B\,y_R - x_R\,y_B)\,z_к;$$

$$A_3 = (y_R\,z_G - y_G\,z_R)\,x_к + (x_G\,z_R - x_R\,z_G)\,y_к + (x_R\,y_G - x_G\,y_R)\,z_к. \tag{3.117}$$

Для расчетов по (3.109), (3.115), (3.116) найдем яркости $L_{Rи}$, $L_{Gи}$, $L_{Bи}$, $L_{Rк}$, $L_{Gк}$, $L_{Bк}$ основных цветов приемника при воспроизведении данного цвета *Ци* и заданной контрольной цветности $Ц_к$. На выходах передающей камеры при передаче изображения сцены, создающей излучение со спектральным распределением мощности P_λ, при реальных спектральных характеристиках камеры и $\gamma_{п.тi} \neq 1$, учитывая (3.104), получим сигналы

$$E_R = C_1 \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{r}'_п P_\lambda \, d\lambda \right)^{\gamma_{п.тR}} = C_1 (R'_{п.и})^{\gamma_{п.тR}};$$

$$E_G = C_2 \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{g}'_п P_\lambda \, d\lambda \right)^{\gamma_{п.тG}} = C_2 (G'_{п.и})^{\gamma_{п.тG}};$$

$$E_B = C_3 \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{b}'_п P_\lambda \, d\lambda \right)^{\gamma_{п.тB}} = C_3 (B'_{п.и})^{\gamma_{п.тB}}, \qquad (3.118)$$

где $\gamma_{п.тi}$ — коэффициент нелинейности передающей телевизионной трубки; C_1, C_2, C_3 — коэффициенты пропорциональности.

На входах трехцветного кинескопа приемника, после гамма-корректора, с учетом (3.118) сигналы

$$E'_R = d_R E'_{Rгк} = d_R E_R^{1/\gamma_{гкR}} = d_1 (R'_{п.и})^{\gamma_{п.тR}/\gamma_{гкR}};$$

$$E'_G = d_G E'_{Gгк} = d_G E_G^{1/\gamma_{гкG}} = d_2 (G'_{п.и})^{\gamma_{п.тG}/\gamma_{гкG}};$$

$$E'_B = d_B E'_{Bгк} = d_B E_B^{1/\gamma_{гкB}} = d_3 (B'_{п.и})^{\gamma_{п.тB}/\gamma_{гкB}}, \qquad (3.119)$$

где d_R, d_G, d_B, d_1, d_2, d_3 — коэффициенты пропорциональности; $1/\gamma_{гкi}$ коэффициенты нелинейной коррекции в гамма-корректоре; $E'_{гк}$ с соответствующими индексами R, G, B — сигналы на выходе гамма-корректора, E_R, E_G, E_B — сигналы на входе гамма-корректора. Создаваемые этими сигналами яркости основных цветов приемника

$$L_{Rи} = h_1 (E'_R)^{\gamma_{кR}} = h_2 (R'_{п.и})^{\gamma_{п.тR}\gamma_{кR}/\gamma_{гкR}};$$

$$L_{Gи} = h_3 (E'_G)^{\gamma_{кG}} = h_4 (G'_{п.и})^{\gamma_{п.тG}\gamma_{кG}/\gamma_{гкG}};$$

$$L_{Bи} = h_5 (E'_B)^{\gamma_{кB}} = h_6 (B'_{п.и})^{\gamma_{п.тB}\gamma_{кB}/\gamma_{гкB}}, \qquad (3.120)$$

где $\gamma_{кR}$, $\gamma_{кG}$, $\gamma_{кB}$ — коэффициенты нелинейности кинескопа, h_1, ... h_6 постоянные коэффициенты. Для неискажений цветопередачи необходимо выполнить условия гамма-коррекции (3.13):

$$\gamma_{п.тR}\gamma_{кR}/\gamma_{гкR} = \gamma_{п.тG}\gamma_{кG}/\gamma_{гкG} = \gamma_{п.тB}\gamma_{кB}/\gamma_{гкB} = 1. \qquad (3.121)$$

Коэффициенты нелинейности для кинескопа $\gamma_{кR}$, $\gamma_{кG}$, $\gamma_{кB} > 1$ их стандартное значение 2,8) $\gamma_{п.тi} < 1$. Необходимо, чтобы $1/\gamma_{г.кi} < 1$. Поэтому $\gamma_{гкi} > 1$. Это означает, что гамма-корректор извлекает из сиг-

нала корень степени $\gamma_{гк}$. Подставив (3.121) в (3.120), учитывая (3.104), получим, что при передаче изображения сцены со спектральным распределением мощностн излучения P_λ в приемнике создаются яркости:

$$L_{Rи} = h_2 R'_{п.н} = n_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{r}'_п P_\lambda \, d\lambda = n_1 I_{Rи};$$

$$L_{Gи} = h_4 G'_{п.н} = n_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{g}'_п P_\lambda \, d\lambda = n_2 I_{Gи};$$

$$L_{Bи} = h_6 B'_{п\ и} = n_3 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{b}'_п P_\lambda \, d\lambda = n_3 I_{Bи}, \qquad (3.122)$$

где n_1, n_2, n_3 — постоянные коэффициенты, $I_{Rи}$, $I_{Gи}$, $I_{Bи}$ — значения интегралов в (3.122).

При воспроизведении контрольного цвета $Ц_к$ по аналогии с (3.122) можно написать

$$L_{Rк} = n_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{r}'_п P_{\lambda к} \, d\lambda = n_1 I_{Rк}; \quad L_{Gк} = n_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{g}'_п P_{\lambda к} \, d\lambda = n_2 I_{Gк};$$

$$L_{Bк} = n_3 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{b}'_п P_{\lambda к} \, d\lambda = n_3 I_{Bк}. \qquad (3.123)$$

Для вычисления координат $X_и$, $Y_и$, $Z_и$ цвета $Ц_и$ подставим (3.123) в (3.115) и результат вместе с (3.122) в (3.109) (при этом $X_и$, $Y_и$, $Z_и$ в левой части (3.109) заменим на $X'_и$, $Y'_и$, $Z'_и$, так как используем при их расчете реальные характеристики камеры $\bar{r}'_п$, $\bar{g}'_п$, $\bar{b}'_п$) и получим

$$X'_и = (m_к/D)\, n_1 n_2 n_3 (a_1 x_R + b_1 x_G + c_1 x_B);$$
$$Y'_и = (m_к/D)\, n_1 n_2 n_3 (a_1 y_R + b_1 y_G + c_1 y_B);$$
$$Z'_и = (m_к/D)\, n_1 n_2 n_3 (a_1 z_R + b_1 z_G + c_1 z_B), \qquad (3.124)$$

$$a_1 = I_{Bк} I_{Gк} I_{Rк} A_1; \quad b_1 = I_{Bк} I_{Gк} I_{Rк} A_2; \quad c_1 = I_{Bк} I_{Gк} I_{Rк} A_3. \qquad (3.125)$$

При определении координат цветности цвета изображения $x'_и$, $y'_и$, $z'_и$ множитель $(m_к/D)\, n_1 n_2 n_3$ сократится, и поэтому нет необходимости его вычислять. Для определения этих координат при любом цвете $Ц_и$ можно применить и другой метод, если известны относительные яркости основных цветов приемника $L'_{Rи}$, $L'_{Gи}$, $L'_{Bи}$ из (3.55), получаемые при передаче цвета оригинала $Ц_о$. Для этого для контрольного цвета $Ц_к$ напишем

$$L'_{Rк} = L_{Rк}/L_{и.к} = \alpha_к; \quad L'_{Gк} = L_{Gк}/L_{и.к} = \beta_к; \quad L'_{Bк} = L_{Bк}/L_{и.к} = \delta_к, \qquad (3.126)$$

где $L_{и.к} = L_{Rк} + L_{Gк} + L_{Bк}$; $\alpha_к + \beta_к + \delta_к = 1$. (3.127)

Коэффициенты $\alpha_к$, $\beta_к$, $\delta_к$ находим из (3.56). Из (3.123) и (3.126 имеем

$$n_1 = \alpha_к L_{и.к}/I_{Rк};\ n_2 = \beta_к L_{и.к}/I_{Gк};\ n_3 = \delta_к L_{и.к}/I_{Bк}. \quad (3.128)$$

Подставив (3.128) в (3.122), имеем для любого цвета $Ц_0$: абсолютные яркости основных цветов приемника

$$L_{Rи} = n_1 I_{Rи} = \alpha_к L_{и.к} I_{Rи}/I_{Rк};\ L_{Gи} = n_2 I_{Gи} = \beta_к L_{и.к} I_{Gи}/I_{Gк};$$
$$L_{Bи} = n_3 I_{Bи} = \delta_к L_{и.к} I_{Bи}/I_{Bк}, \quad (3.129)$$

относительные яркости основных цветов приемника для $Ц_0$

$$L''_{Rи} = L_{Rи}/L_{и.к} = \alpha_к I_{Rи}/I_{Rк};\ L''_{Gи} = L_{Gи}/L_{и.к} = \beta_к I_{Gи}/I_{Gк};$$
$$L''_{Bи} = L_{Bи}/L_{и.к} = \delta_к I_{Bи}/I_{Bк}, \quad (3.130)$$

отсюда яркость цвета изображения $Ц_и$ для любого цвета $Ц_о$:

$$L_{Ци} = L_{Rи} + L_{Gи} + L_{Bи} = L_{и.к}(L''_{Rи} + L''_{Gи} + L''_{Bи}) = L_{и.к} N, \quad (3.131)$$

где $N = L''_{Rи} + L''_{Gи} + L''_{Bи}$ — постоянный коэффициент.

Далее из (3.131) и (3.130) получим относительные яркости основных цветов приемника для любого цвета $Ц_0$:

$$L'_{Rи} = L_{Rи}/L_{Ци} = L_{Rи}/(L_{и.к} N) = L''/N = \alpha_к I_{Rи}/(N I_{Rк});$$
$$L'_{Gи} = \beta_к I_{Gи}/(N I_{Gк});\ L'_{Bи} = \delta_к I_{Bи}/(N I_{Bк}). \quad (3.132)$$

По (2.288), (2.286) и (2.287) находим $x'_и$, $y'_и$, $z'_и$ через значения относительных яркостей из (3.132); коэффициент N при этом сокращается. Тот же результат можно получить графическим методом (полагая $N = 1$) с помощью рис. 3.17 или по (3.126) и рис. 3.9. На практике это реализуется установкой таких яркостей основных цветов, при которых цвет $Ц_к$ воспроизводится без искажений цветности.

Расчет при неискаженном воспроизведении равносигнального контрольного цвета $Ц_{рс}$. В практике к выбранному контрольному цвету $Ц_к$ часто предъявляется дополнительное требование, а именно при передаче цвета $Ц_{рс} = Ц_к$ сигналы, которые обозначим $E'_{Rрс}$, $E'_{Gрс}$, $E'_{Bрс}$, после гамма-корректора, в некоторой точке M тракте должны быть равны друг другу и на экране кинескопа должен воспроизводиться цвет $Ц_{рс}$, что достигается регулировкой режима прожекторов кинескопа и подбором усиления тракта от точки M до входа кинескопа. При передаче изображения сцены с цветом $Ц_{рс}$ необходимо, регулируя усиление каналов тракта передачи от выхода передающей камеры до точки M тракта, установить в этой точке равенство сигналов

$$E'_{Rрс} = E'_{Gрс} = E'_{Bрс} = E_{рс}. \quad (3.133)$$

Координаты цветности $x'_и$, $y'_и$, $z'_и$ изображения рассчитываем по формулам, приведенным для случая неискаженного воспроизведения контрольной цветности $Ц_к$, заменив индекс к на рс.

Расчет искажений цветопередачи. Искажения цветопередачи во всех случаях находим как величины и направления отрезков, равных разностям координат цветности цвета оригинала и изображении:

$$\Delta x = x'_{и} - x_{о}; \quad \Delta y = y'_{и} - y_{о}; \quad \Delta z = z'_{и} - z_{о}. \qquad (3.134)$$

К сожалению, определив искажения для одного цвета, нельзя судить об искажениях других цветов. Поэтому для исследования искажений гаммы цветов следует находить искажения для каждого цвета $Ц_0$ в отдельности, зная спектральные характеристики P_λ его излучения. Если $Ц_0$ находится на диаграмме цветностей за пределами треугольника основных цветов приемника, то он воспроизводится искаженно, как цвет $Ц_и$, представленный точкой, лежащей внутри вблизи от стороны этого треугольника. Искажения цветопередачи обычно ведут к потере насыщенности и изменению цветового тона. Оценивая допустимость искажений цветопередачи, следует учитывать чувствительность глаза к изменениям цветности (см. § 3.1).

Для расчета верности цветопередачи можно использовать 10 контрольных цветов, имеющих значения спектральной плотности мощности излучения (в относительных единицах величин), данные в табл. 3.9.

Таблица 3.9

λ, нм	Спектральная плотность мощности для 10 цветов									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	*C*
380	2	0	4	13	2	50	50	50	40	33
400	3,2	0	0,3	13	4	63	63	63	50	63,3
420	5	0	0	10	6	80	80	40	55	98,1
440	10	0,4	0	8	8,6	80	80	20	55	121,5
460	20	4	10	6	6	80	80	20	30	123,1
480	40	25	80	2	2	25	25	20	8	123,9
500	70	70	85	0,3	0	20	60	20	0,3	112,1
520	70	75	85	0	0	10	40	20	0	96,2
540	35	70	85	0	0	6	16	16	0	102,1
560	10	40	85	2	0	3	30	30	2	105,3
580	2	25	85	50	0	4	10	35	50	97,8
600	0	15	85	80	0	5	10	40	80	89,7
620	0	6,3	85	80	0	5,5	10	60	80	88,1
640	0	3,2	85	80	0	6	10	40	80	87,8
660	0	1,5	85	80	11	6	10	60	80	87,9
680	0	4	80	80	46	6	10	60	80	84
700	0	6	80	80	79	5	10	60	80	76,3

В табл. 3.10 приведены значения координат цветности для 10 контрольных цветов, вычисленные по (2.255), (2.251). Выбираем реальные спектральные характеристики передающей камеры $\bar{r}'_{\text{п}}$, $\bar{g}'_{\text{п}}$, $\bar{b}'_{\text{п}}$ и основные цвета приемника (например, треугольник NTSC, табл.3. 4). В качестве контрольного цвета $Ц_{\text{к}}$ берем стандартный белый цвет C (см. табл. 2.11 и 2.12). Применяя полученные здесь формулы найдем координаты цветности изображения 10 заданных в табл. 3.9 цветов $x'_{\text{н}}$, $y'_{\text{н}}$, $z'_{\text{н}}$ для случая, когда контрольный цвет $Ц_{\text{к}}$ воспроизводится без искажений. На рис. 3.23 построены точки *1* ... *10* с координатами x_0, y_0, z_0 и точки *1'* ... *10'* с координатами $x'_{\text{н}}$, $y'_{\text{н}}$, $z'_{\text{н}}$.

Таблица 3.10

Координата цветности	Значения координат цветности для цветов									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	C
x_0	0,125	0,265	0,411	0,590	0,242	0,178	0,204	0,400	0,458	0,310
y_0	0,493	0,590	0,471	0,335	0,060	0,088	0,189	0,347	0,239	0,316
z_0	0,382	0,146	0,121	0,076	0,698	0,734	0,607	0,254	0,306	0,374

3.8. ПОСТРОЕНИЕ СЕТОК ПОСТОЯННЫХ ОТНОШЕНИЙ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Линии постоянных отношений координат цветности $r_{\text{п}}$ $b_{\text{п}}$; $r_{\text{п}}/g_{\text{п}}$; $b_{\text{п}}/g_{\text{п}}$. Построим линии постоянных отношений координат цвета $R_{\text{п}}/G_{\text{п}}$, $R_{\text{п}}/B_{\text{п}}$, $B_{\text{п}}/G_{\text{п}}$, в системе прямоугольных координат $r_{\text{п}}$, $b_{\text{п}}$, где $R_{\text{п}}$, $G_{\text{п}}$, $B_{\text{п}}$ и $r_{\text{п}}$, $g_{\text{п}}$, $b_{\text{п}}$ — координаты цвета и цветности цвета $Ц$ в системе основных цветов приемника. Уравнения для этих линий:

$$R_{\text{п}}/G_{\text{п}} = r_{\text{п}} M/(g_{\text{п}} M) \quad r_{\text{п}}\, g_{\text{п}};\ R_{\text{п}}/B_{\text{п}} - r_{\text{п}}/b_{\text{п}};\ B_{\text{п}}\, G_{\text{п}} = b_{\text{п}}/g_{\text{п}}, \quad (3.135)$$

где M — модуль цвета $Ц$ в системе основных цветов приемника.

По аналогии с рис. 2.40 обозначим

$$r_{\text{п}}/b_{\text{п}} = c_1; \quad r_{\text{п}} - c_1 b_{\text{п}}. \quad (3.136)$$

Формулы (3.136) являются уравнениями пучка прямых, проходящих через начало координат (например, рис. 3.24, прямая OA). Каждой прямой такого пучка соответствует свое значение c_1. При $b_{\text{п}} = 1$ имеем $r_{\text{п}} = c_1$. Прямая CA_1, проходящая через точку $b_{\text{п}} = 1$ на оси $b_{\text{п}}$, задается уравнением $r_{\text{п}} = -c_2 b_{\text{п}} + c_2$ или $r_{\text{п}} = c_2 (1 - b_{\text{п}})$. Подставив сюда $b_{\text{п}} = 1 - (r_{\text{п}} + g_{\text{п}})$, получим для прямой CA_1 выражение $r_{\text{п}}$ $c_2 (1 - 1$ $r_{\text{п}} + g_{\text{п}}) - c_2 (r_{\text{п}}$ $g_{\text{п}})$ или $r_{\text{п}} (1 - c_2)$ $c_2 g_{\text{п}}$, откуда

$$r_{\text{п}}/g_{\text{п}} = c_2/(1 - c_2). \quad (3.137)$$

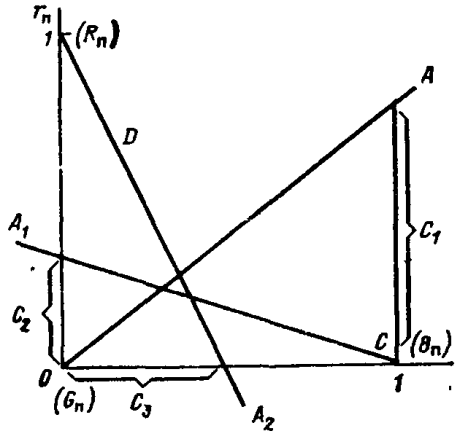


Рис. 3.24. Линии постоянных значений отношений координат цветности $r_п/b_п = c_1 = \alpha_1$; $r_п/g_п = c_2/(1-c_2) = \alpha_2$; $b_п/g_п = c_3/(1-c_3) = \alpha_3$ в системе координат $r_п$, $b_п$

Уравнение (3.137) справедливо для пучка прямых, исходящих из точки $b_п = 1$ на оси $b_п$. Каждая прямая этого пучка имеет свое значение c_2.

Прямая DA_2, проходящая через точку $r_п = 1$ на оси $r_п$, задается уравнением $b_п = -c_3 r_п + c_3 = c_3(1 - r_п)$. Подставив в него $1 - r_п = g_п + b_п$, получим $b_п = c_3(g_п + b_д)$ или $b_п(1 - c_3) = c_3 g_п$, откуда

$$b_п/g_п = c_3/(1 - c_3). \qquad (3.138)$$

Уравнение (3.138) справедливо для пучка прямых, исходящих из точки $r_п = 1$ на оси $r_п$, и каждая прямая этого пучка имеет свое значение c_3.

Задаваясь значениями $r_п/b_п = \alpha_1$; $r_п/g_п = \alpha_2$; $b_п/g_п = \alpha_3$, т. е. значениями (3.135), находим $c_1 = \alpha_1$, $c_2 = \alpha_2/(1 + \alpha_2)$; $c_3 = \alpha_3/(1 + \alpha_3)$. Из табл. 3.11 можно получить эти значения.

Таблица 3.11

α	0,2	0,4	0,5	0,6	0.8	1	2	5	10	∞
$\frac{\alpha}{1+\alpha}$	0,16667	0,28571	0,33333	0,375	0,44444	0,5	0,66667	0,83333	0,90909	1

С использованием табл. 3.11 и рис. 3.24 и 3.25 построены пучки прямых для разных значений c_1, c_2, c_3 (рис. 3.25).

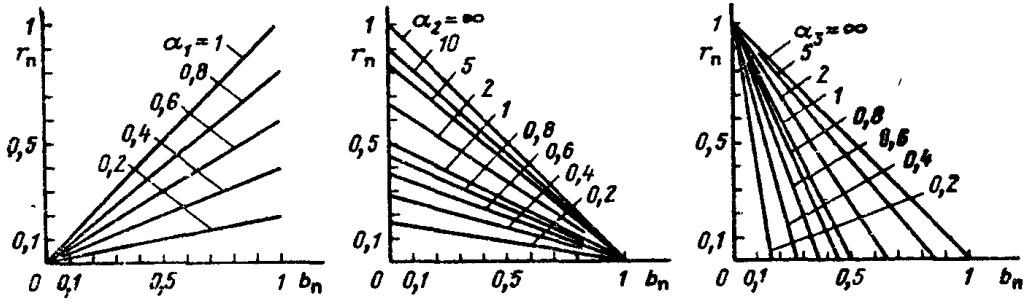


Рис. 3.25. Линии постоянных значений отношений α_1, α_2, α_3

Линии постоянных значений линейных нормализованных цветоразностей $(R_п - Y)/Y$, $(G_п - Y)/Y$, $(B_п - Y)/Y$ в системе прямоугольных координат $r_п$, $b_п$. Пользуясь (3.80), получим

$$K = \frac{R_п - Y}{Y} = \frac{R_п - \alpha R_п - \beta G_п - \delta B_п}{\alpha R_п + \beta G_п + \delta B_п} = \frac{R_п (1-\alpha) - \beta G_п - \delta B_п}{\alpha R_п + \beta G_п + \delta B_п}.$$

Отсюда $R_п (1 - \alpha - K\alpha) - G_п (\beta + K\beta) - B_п (\delta + K\delta) = 0$. Разделим это выражение на $R_п + G_п + B_п = M$ и получим $r_п (1 - \alpha - K\alpha) - g_п (\beta + K\beta) - b_п (\delta + K\delta) = 0$. Подставив $g_п = 1 - (r_п + b_п)$, получим $r_п (1 - \alpha - K\alpha) - (1 - r_п - b_п)(\beta + K\beta) - b_п (\delta + K\delta) = 0$. Отсюда $r_п (1 - \alpha - K\alpha + \beta + K\beta - b_п \times (\delta + K\delta - \beta - K\beta) = \beta + K\beta$, или уравнение прямой

$$r_п [1 - (\alpha - \beta)(1 + K)] + b_п (\beta - \delta)(1 + K) = \beta (1 + K). \qquad (3.140)$$

При $b_п = 0$ из (3.140) имеем

$$r_п = \beta (1 + K)/[1 - (\alpha - \beta)(1 + K)]. \qquad (3.141)$$

Для точки $b_п = 0$ и $K = 1$ (точка A на рис. 3.26) из (3.141) и (3.57) получим $r_п = 0{,}745$. При $r_п = 0$ из (3.140) и (3.57) имеем для треугольника NTSC (см. табл. 3.4) координату

$$b_п = \beta (1 + k)/[(\beta - \delta)(1 + k)] = \beta/(1 - \delta) = \\ = 0{,}587/(0{,}587 - 0{,}114) = 1{,}24 \qquad (3.142)$$

точки пересечения прямой (3.141) с осью $b_п$ (точка D, рис. 3.26). Эта координата не зависит от K, поэтому точка D является центром пучка прямых $(R_п - Y)/Y = K$, определяемых из (3.140), и лежит вне треугольника основных цветов приемника (так как для нее $b_п > 1$).

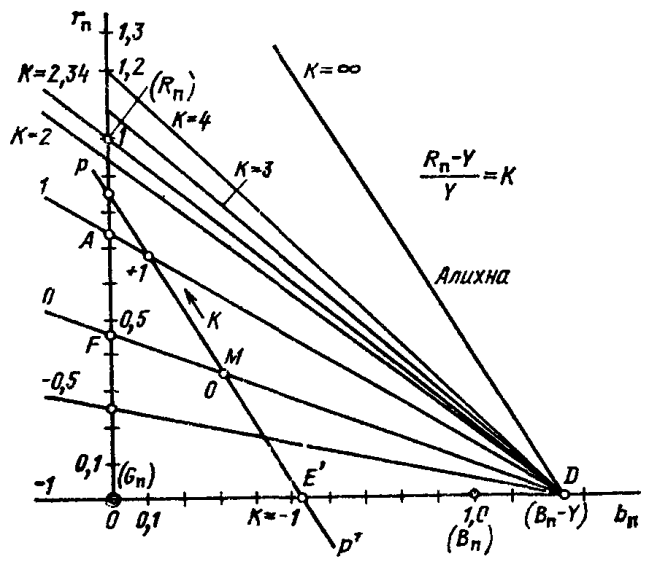


Рис. 3.26. Линии $K = const$ при $\alpha = 0{,}299$; $\beta = 0{,}587$; $\delta = 0{,}114$

Эту точку назовем *основным цветом* ($B_п - Y$) (по аналогии с точкой $B_ц$ на рис. 3.24). Точка D, как лежащая вне треугольника основных цветов, не представляет собой реального цвета в системе $R_пG_пB_п$. На рис. 3.26 показаны прямые пучка $(R_п - Y)/Y - K$ для различных значений K. Точки их пересечения с осью $r_ц$, находим, подставляя различные значения K в (3.141). Результаты расчетов при $\alpha = 0{,}299$; $\beta = 0{,}587$ даны в табл. 3.12.

Таблица 3.12

K	—1	—0,5	0	1	2	2,34	3	4	∞
$r_п$	0	0,25656	0,45547	0,74492	0,94474	0,99932	1,09108	1,20287	2,03819

Аналогично находим

$$N = (B_п - Y)/Y = \frac{B_ц - \alpha R_п - \beta G_ц - \delta B_п}{\alpha R_ц + \beta G_ц + \delta B_п} =$$

$$= \frac{B_п(1-\delta) - \alpha R_п - \beta G_ц}{\alpha R_п + \beta G_ц + \delta B_п}. \qquad (3.143)$$

Отсюда после преобразований, аналогичных сделанным выше при получении (3.140), находим уравнение прямой

$$r_ц(\beta - \alpha)(1+N) + b_ц[1 + (1+N)(\beta - \delta)] = \beta(1+N). \qquad (3.144)$$

Для точки C на рис. 3.27 получим из (3.144)

$$b_ц = 0;\ r_ц = \beta(1+N)/[(\beta-\alpha)(1+N)] - \beta/(\beta-\alpha) =$$
$$= 0{,}587/(0{,}587 - 0{,}299) = 2{,}04. \qquad (3.145)$$

При $r_п - 0$ из (3.144) имеем

$$b_ц = \beta(1+N)/[1 + (1+N)(\beta-\delta)]. \qquad (3.146)$$

Для точки E на рис. 3.27, в которой $N - 0$, $r_ц$ 0, получим из (3.146) $b_ц = 0{,}399$.

Точка C не зависит от N, поэтому является центром пучка прямых $(B_п - Y)/Y = N$, определяемых (3.144), и лежит вне треугольника основных цветов приемника, так как для нее $r_п > 1$. Назовем эту точку *основным цветом* ($R_п - Y$) по аналогии с точкой $R_п$ на рис. 3.26. Точка C, как лежащая вне треугольника основных цветов приемника, *не* представляет собой реального цвета в системе $R_пG_пB_п$. Точки пересечения прямых пучка $(B_п - Y)/Y = N$ при разных значениях N (рис. 3.27) с осью $b_ц$ находим, подставляя различные значения N в (3.146). Результаты расчетов даны в табл. 3.13 при $\alpha = 0{,}299$; $\beta = 0{,}587$; $\delta = 0{,}114$.

Таблица 3.13

N	—1	0	1	2	3	4	5	∞
$b_п$	0	0,39851	0,60329	0,72799	0,81189	0,87221	0,91766	1.24101

Прямая, соединяющая на рис. 3.27 точки $(R_п - Y)$ и $(B_п - Y)$, является местом точек, представляющих смесь цветов $(R_п - Y)$ и $(B_п - Y)$. Так как эти цвета не имеют яркости, то их смесь также не имеет яркости, т. е. данная прямая является алихной, уравнение которой, т. е. прямой CD (см. рис. 3.27), имеет вид

$$r_п = -k_1 b_п + k_2; \quad k_1 = OC/OD; \quad k_2 = OC. \tag{3.147}$$

Из (3.142) и (3.145) имеем

$$OD \quad \beta/(\beta - \delta); \quad OC \quad \beta(\beta - \alpha). \tag{3.148}$$

Подставив (3.148) в (3.147), получим уравнение алихны

$$r_п = [-(\beta - \delta) b_п/(\beta - \alpha)] + \beta/(\beta - \alpha). \tag{3.149}$$

Основной цвет $(G_п - Y)$ также изображается точкой, лежащей на алихне (как будет показано дальше), так как он не имеет яркости. Подставив координаты точки C из (3.145) в (3.140), получим K – ∝ для прямой $СД$.

Подставив координаты точки D из (3.142) в (3.144), получим N –- ∞ для прямой $СД$.

Для равностимульного цвета $Ц_р$ в системе $R_п G_п B_п$ (см. рис. 3.27) подставим в (3.144) $r_п$ – $b_п$ 1/3 и получим N = 0, т. е. цвет $Ц_р$ ле-

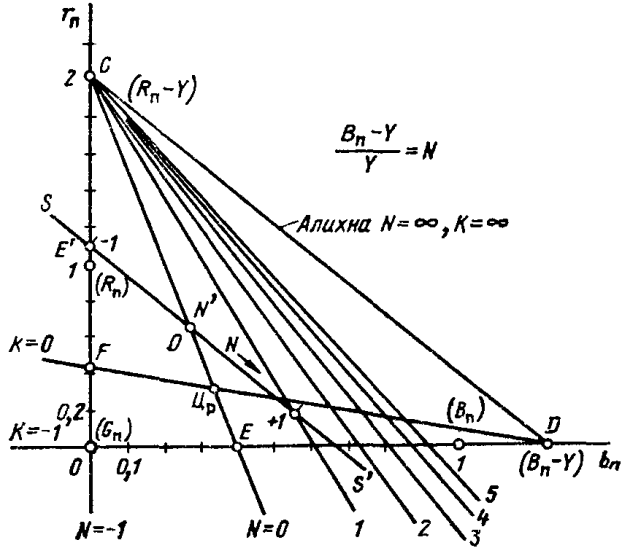


Рис. 3.27. Линии $N = const$ при $\alpha = 0{,}299$; $\beta = 0{,}587$; $\delta = 0{,}114$

жит на прямой, проходящей через точку E. Аналогично подставив $r_п = b_п = 1/3$ в (3.140), получим $K = 0$, т. е. точка $Ц_р$ лежит на прямой DF. Таким образом, $Ц_р$ — точка пересечения прямых DF и CE. Подставив в (3.144) $r_п = 0$ и $b_п = 0$, получим $N = -1$ для оси $r_п$. Подставив в (3.140) $r_и = 0$ и $b_п = 0$, получим $K = -1$ для оси $b_п$.

Если алихна задана, то можно построить прямые $(R_п - Y)/Y = K$ следующим образом: проводим на рис. 3.26 прямую pp', параллельную алихне (т. е. прямой с $K = \infty$). Точка M пересечения прямой pp' с прямой DF соответствует $K = 0$. Точка E' пересечения прямой pp', с осью $b_п$ соответствует $K = -1$. Следовательно, длина отрезка $E'M$ может быть принята за единицу для значений K. Откладывая отрезки $E'M$ влево и вправо от точки M на прямой pp', получим на ней шкалу значений K. Покажем, что эта шкала равномерна.

Уравнение прямой pp', параллельной алихне (3.149):

$$r_п = [-(\beta - \delta) b_п/(\beta - \alpha)] + n\beta/(\beta - \alpha), \qquad (3.150)$$

где n — постоянный коэффициент.

Подставив $r_п$ из (3.150) в (3.140) пучка прямых из точки D, получим для точек пересечения прямой pp' с прямыми этого пучка координату

$$b_п = \{\beta(1 + K)(\beta - \alpha) - n\beta[1 - (\alpha - \beta)(1 + K)]\}/(\delta - \beta), \qquad (3.151)$$

линейно зависящую от K, поэтому постоянное приращение K создает постоянное приращение $b_п$ и, следовательно, постоянное приращение на прямой pp' (3.150), т. е. шкала значений K на прямой pp' равномерна.

Аналогичное построение можно сделать на рис. 3.27, проведя прямую SS', параллельную алихне. Тогда точка N' пересечения прямой SS' с прямой CE соответствует $N = 0$, точка E' соответствует $N = -1$ длина отрезка $E'N'$ может быть принята за единицу для величины N, что позволяет построить на прямой SS' равномерную шкалу значений N.

Аналогично (3.139) находим

$$F = (G_и - Y)/Y = [-\alpha R_п + (1 - \beta) G_и - \delta B_п]/(\alpha R_п + \beta G_п + \delta B_п). \qquad (3.152)$$

Отсюда получим после преобразований

$$[(\alpha - \beta)(1 + F) + 1] r_п + [(\delta - \beta)(1 + F) + 1] b_п = \beta(1 + F). \qquad (3.153)$$

Найдем точку пересечения прямой (3.153) с алихной. Для этого подставим $r_п$ из (3.149) в (3.153). При $\alpha = 0{,}299$; $\delta = 0{,}114$ получим $b_п = \alpha/(\alpha - \delta)$ $0{,}299/(0{,}299 - 0{,}114) = 1{,}62$. Подставив это значение в (3.149), получим $r_п = (\beta - \alpha)^{-1}[\alpha(\beta - \delta)(\delta - \alpha)^{-1} + \beta] = -0{,}62$. Значения $b_п = 1{,}62$ и $r_п = -0{,}62$ являются координатами точки пересечения прямой (3.153) с алихной. Так как эти координаты не зависят от F из (3.152), то эта точка является центром пучка прямых, имеющих различные значения F. В центре пучка помещает-

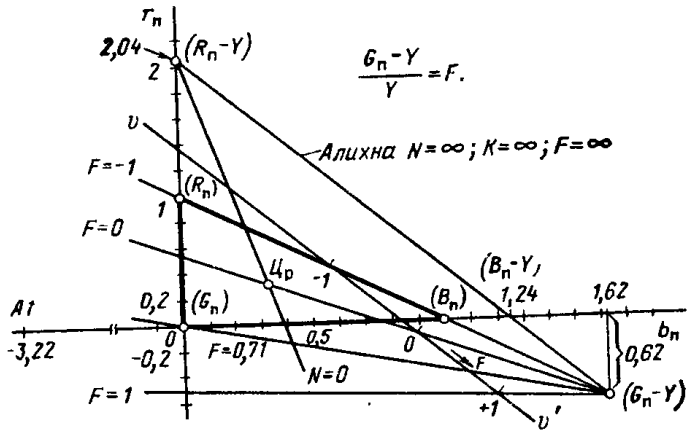


Рис. 3.28. Линии $F=const$ при $\alpha=0{,}299$; $\beta=0{,}587$; $\delta=0{,}114$

ся основной цвет ($G_п$ — Y) по аналогии с предыдущим. Найдем на оси $b_п$ точки, через которые проходят прямые (3.153) при $F=0$ и $F=1$. Для этого подставим $r_п=0$ в (3.153) и получим

$$b_п=[1-\beta(1+F)]/[(\delta-\beta)(1+F)+1]. \qquad (3.154)$$

Отсюда для $F=0$ получим $b_п=0{,}78$ и для $F=1$ получим $b_п=-3{,}22$ (точка A_1 на рис. 3.28; прямая для $F=1$ проходит также через точку $b_п=0$, $r_п=-0{,}410$). Проведя через эти точки прямые из центра пучка и пересекая из прямой vv', параллельной алихне, найдем на этой прямой отрезок, длина которого равна единице для величин F. Как и на рис. 3.26, шкала значений F на прямой vv' равномерна. Это построение сделано на рис. 3.28. Здесь точка пересечения прямых $F=0$ и $N=0$ представляет равностимульный цвет $Ц_р$.

Прямая (3.153), проходящая через точку $G_п$, имеет координаты $r_п=0$ и $b_п=0$, для нее из (3.153) получим $1-\beta(1+F)=0$, откуда $F=(1-\beta)/\beta=0{,}71$. Разделив числитель и знаменатель (3.154) на $(1+F)$, получим $b_п=-\beta/(\delta-\beta)$ при $F=\infty$, что совпадает с (3.142) и является координатой $b_п$ для точки ($B_п$ — Y). Таким образом, на алихне $F=\infty$. Прямая, проходящая через точки $R_п$ и $B_п$ в точке $R_п$, имеет $r_п=1$ и $b_п=0$; для нее из (3.153) получим $F=-1$.

Линии постоянных значений линейных нормализованных цветоразностей на диаграмме цветностей x, y. Построим на диаграмме цветностей x, y сетку прямых, соответствующих постоянным значениям K, F, N из (3.139), (3.152), (3.143).

По аналогии с (2.202) напишем, учитывая что $X/Y=x/y$; $z/Y=z/y$; $z=1-(x+y)$:

$$K=(R_п-Y)/Y=p_1\varepsilon_1+q_1\varepsilon_2;\ F=(G_п-Y)/Y=p_2\varepsilon_1+q_2\varepsilon_2;$$

$$N=(B_п-Y)/Y=p_3\varepsilon_1+q_3\varepsilon_2;\ \varepsilon_1=(x/y)-f_1;$$

$$\varepsilon_2=[(1-x-y)/y]-f_2, \qquad (3.155)$$

где f_1, f_2 и p, q с индексами 1 ... 3 даны в формулах, аналогичных (2.196) и (2.203) и в (П.61) и (П.64). Из (3 155) получим

$$y=[x(p_1-q_1)+q_1]/[K+p_1f_1+q_1(1+f_2)],$$
$$y=[x(p_2-q_2)+q_2]/[F+p_2f_1+q_2(1+f_2)],$$
$$y=[x(p_3-q_3)+q_3]/[N+p_3f_1+q_3(1+f_2)]. \qquad (3.156)$$

Эти уравнения представляют три пучка прямых. Действительно, из геометрии известно, что уравнение пучка прямых имеет вид

$$y-y_1=\nu(x-x_1), \qquad (3.157)$$

где ν — величина, принимающая всевозможные числовые значения, x_1 и y_1 — координаты центра пучка. Обозначим в (3.155):

$$K+p_1f_1+q_1(1+f_2)=\theta_1;\ F+p_2f_1+q_2(1+f_2)=\theta_2;$$
$$N+p_3f_1+q_3(1+f_2)=\theta_3;$$
$$\nu_1=(p_1-q_1)/\theta_1;\ \nu_2=(p_2-q_2)/\theta_2;\ \nu_3=(p_3-q_3)/\theta_3;$$
$$x_1=q_1/(q_1-p_1);\ x_2=q_2/(q_2-p_2);\ x_3=q_3/(q_3-p_3). \qquad (3.158)$$

Приведем (3.156) к виду

$$y-y_1=\nu_1(x-x_1);\ y-y_2=\nu_2(x-x_2);\ y-y_3=\nu_3(x-x_3), \qquad (3.159)$$

где $y_1=y_2=y_3=0$. (3.160)

Здесь x_1, y_1; x_2, y_2; x_3, y_3 — координаты центров пучков с параметрами K, F, N соответственно; ν_1, ν_2, ν_3 — крутизны прямых этих пучков. Из (3.160) следует, что центры этих пучков находятся на оси x. Подставив (П.61) и (П.64) в (3.158), найдем для треугольника NTSC из табл. 3.4:

$$x_1=0{,}13111;\quad x_2=-0{,}02960;\quad x_3=1{,}06947. \qquad (3.161)$$

Найдем уравнения сторон треугольника основных цветов приемника в системе координат x, y по координатам его вершин x_R, y_R; x_G, y_G; x_B, y_B. Из геометрии известно, что уравнение прямой, проходящей через точки A_1 (x_1, y_1) и A_2 (x_2, y_2), имеет вид

$$(y-y_1)/(y_2-y_1)=(x-x_1)/(x_2\quad x_1). \qquad (3.162)$$

Отсюда уравнения сторон треугольника $G_пB_п$, $B_пR_п$, $R_п$ $G_п$ соответственно:

$$(y-y_G)/(y_B\quad y_G)\quad (x-x_G)/(x_B\quad x_G);$$
$$(y-y_B)/(y_R\quad y_B)=(x\ -x_B)/(x_R\quad x_B);$$
$$(y-y_R)/(y_G-y_R)=(x-x_R)/(x_G-x_R); \qquad (3.163)$$

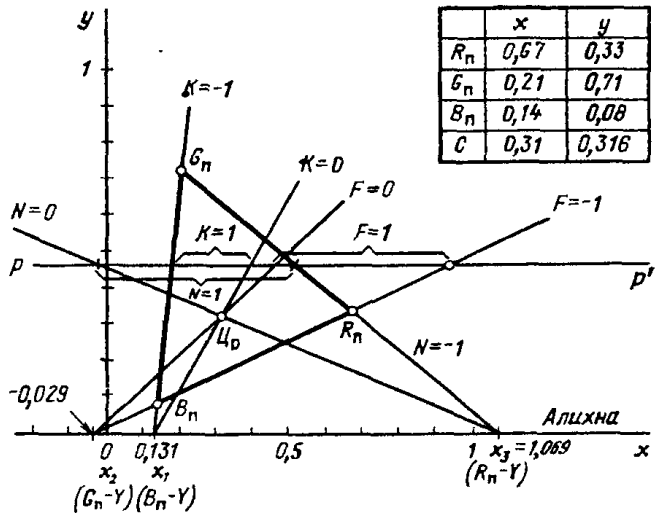
подставив сюда $y = 0$, найдем точки на оси x, в которых продолжения этих сторон пересекают ось x:

$$x = x_1 = x_G - y_G(x_B - x_G)/(y_B - y_G);$$
$$x = x_2 = x_B - y_B(x_R - x_B)/(y_R - y_B);$$
$$x = x_3 = x_R - y_R(x_G - x_R)/(y_G - y_R). \qquad (3.164)$$

Подставив в (3.164) значения координат вершин треугольника основных цветов приемника NTSC, взятые из табл. 3.4, получим те же значения x_1, x_2, x_3, что и в (3.161). Действительно, подставляя в (3.158), значения f_1, f_2 и p, q с индексами 1, 2, 3 соответственно из (П.61) (П.64), (П.4) и (П.5), можно показать, что (3.158) и (3.164) идентичны.

На рис. 3.29 показаны точки x_1, x_2, x_3. Как известно из § 2.9, преобразование координат цветности является проективным преобразованием (дробно-линейным). Отсюда следует, что точка $(R_п - Y)$, т. е. точка x_1, которая на рис. 3.28 была точкой пересечения алихны с прямой $G_п R_п$, на рис. 3.29 также будет такой же точкой (ось x — алихна). Аналогично, точка $(B_п - Y)$ является точкой пересечения алихны с прямой $G_п B_п$. Построив точку равностимульного цвета $Ц_р$ на рис. 3.29 (ее координаты x и y должны быть известны), находим линии, для которых $N = 0$, $F = 0$ и $K = 0$, как прямые, соединяющие эту точку с точками $(R_п - Y)$, $(G_п - Y)$ и $(B_п - Y)$, как на рис. 3.27 и 3.28. На рис. 3.29 $K = -1$ на прямой, соединяющей точки $(B_п - Y)$ и $G_п$; $N = -1$ на прямой, соединяющей точки $(R_п - Y)$ и $G_п$; $F = -1$ на прямой соединяющей точки $(G_п - Y)$ и $R_п$.

Построив прямую pp', параллельную алихне, находим на ней отрезки $K = 1$, $N = 1$, $F = 1$, с помощью которых строим линии постоянных значений K, F, N в виде прямых, исходящих из точек x_1, x_2, x_3.



	x	y
$R_п$	0,67	0,33
$G_п$	0,21	0,71
$B_п$	0,14	0,08
C	0,31	0,316

Рис. 3.29. Графическое построение равномерных шкал значений N, K, F на линии p—p' для треугольника основных цветов приемника NTSC и белого C в качестве $Ц_р$ ($\alpha = 0{,}299$; $\beta = 0{,}587$; $\delta = 0{,}114$)

На линии pp' шкалы значений K, F, N являются равномерными, как и шкала значений K на прямой pp' на рис. 3.26. Построенная таким образом сетка линий показана на рис. 3.30 и 3.31. Значения K, F, N для вершин треугольника $NTSC$, полученные из табл. 3.4, определяются по (3.155) подстановкой в них значений f_1, f_2 и p, q с индексами 1, 2, 3 соответственно из (П.61) и (П.64). Результаты этого расчета даны в табл. 3.14.

Таблица 3.14

Вершина треугольника	K	F	N	K''	N''
$R_п$	2,35	—1	—1	2,35	—1
$G_п$	—1	0,7	—1	—1	—1
$B_п$	—1	1	7,8	—1	7,77

Для построения сетки на рис. 3.30 и 3.31 можно подставить в (3.156) значения f_1, f_2 и p, q с индексами 1 — 3 соответственно из (П.61) и (П.64) и получить уравнения трех пучков прямых, исходящих из точек x_1, x_2, x_3, заданных выражениями (3.158) и (3.161). Для такого построения берем постоянное значение y, например $y = C_1$, и находим x (т. е. находим точки пересечения прямых каждого пучка с прямой $y = C_1$) при заданных значениях K, F, N.

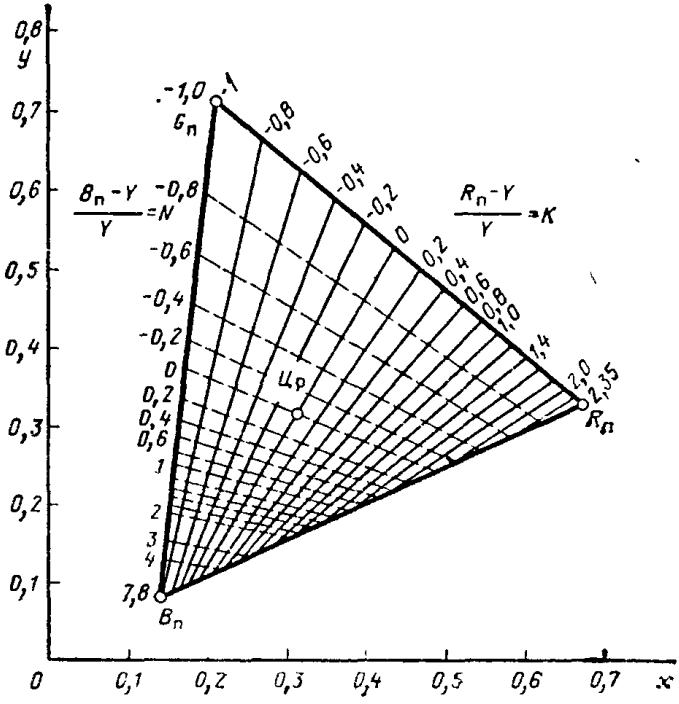


Рис. 3.30. Сетка прямых $K = const$ и $N = const$ на диаграмме цветностей x, y для треугольника основных цветов приемника NTSC и белого цвета C в качестве Ц$_р$

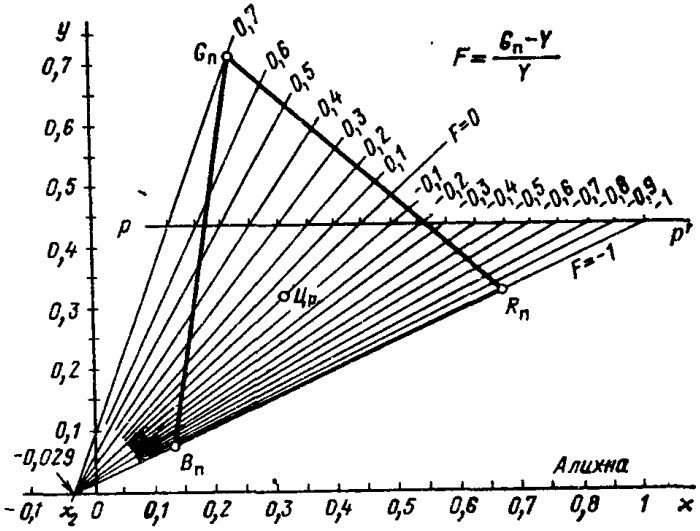


Рис. 3.31. Сетка прямых $F=const$ на диаграмме цветностей x, y для треугольника основных цветов премника NTSC и белого C в качестве $Ц_р$

Из выражений

$$R_п/Y=[(R_п-Y)/Y]+1=K+1;\ G_п/Y=[(G_п-Y)/Y]+1=F+1;$$
$$B_п/Y=[(B_п-Y]/Y]+1=N+1 \qquad (3.165)$$

следует, что с помощью рис. 3.30 и 3.31 легко построить сетку линий с различными значениями $R_п/Y$; $G_п/Y$; $B_п\,Y$, добавляя 1 к значениям K, F, N, данным на этих рисунках. На рис. 3.32 и 3.33 показаны такие сетки.

Линии постоянных значений нелинейных нормализованных цветоразностей K' и N' на диаграмме цветностей x, y. На рис. 3.34 сетка прямых $R_п/Y=\text{const}$ создает на прямой pp', параллельной оси x, равномерную шкалу значений $R_п/Y=A$. На прямой pp' можно также построить шкалу значений $B=A^{1/\gamma}$, например при $\gamma=2$ точка $A=2$ будет соответствовать величине $B=2^{1/2}=\sqrt{2}$ и т. д. Таким образом, будет получена шкала значений $B=(R_п/Y)^{1/\gamma}$. Аналогично можно построить шкалы для $(G_п/Y)^{1/\gamma}$ и $(B_п/Y)^{1/\gamma}$. Для эттого задаемся значением величины B и находим

$$A=B^{\gamma}. \qquad (3.166)$$

Понимая под A любую из величин $R_п/Y$, $G_п/Y$, $B_п/Y$ на прямых pp', ss', vv', параллельных оси x, отмечены точки со значениями A и для них указаны значения B из (3.166). Точки 0 и 1 для A получены построением прямых из точек x_1, x_2, x_3, как показано на рис. 3.32 и 3.33.

Теперь рассмотрим нормализованные цветоразности. Подставив (3.20) вместо $R_п$, $G_п$, $B_п$ в (3.79) при $a_1=a_2=a_3=a$, получим для яркости любого цвета $Ц$:

$$Y=\alpha a_1 E_R+\beta a_2 E_G+\delta a_3 E_B=aE_Y, \qquad (3.167)$$
$$E_Y=\alpha E_R+\beta E_G+\delta E_B, \qquad (3.168)$$

где E_R, E_G, E_B — *линейные сигналы основных цветов* из (3.19), создающие в приемнике с линейным кинескопом ($\gamma_к = 1$) координаты $R_п$, $G_п$, $B_п$ цвета $Ц$ (с яркостью Y) в системе $R_п G_п B_п$. Сигнал E_Y называется *линейным сигналом яркости*.

Для нелинейного кинескопа приемника ($\gamma_к \neq 1$) во избежание искажений цветности сигналы, модулирующие токи трех электронных лучей кинескопа, на основании (3.26), (3.27) и (3.167) при $\gamma_{гкR} = \gamma_{гкG} = \gamma_{гкB} = \gamma_{гк} = \gamma_к$:

$$E'_R = E_R^{1/\gamma_{гк}} = (R_{п.и}/a)^{1/\gamma_{гк}}; \quad E'_G = E_G^{1/\gamma_{гк}} = (G_{п.и}/a)^{1/\gamma_{гк}};$$

$$E'_B = E_B^{1/\gamma_{гк}} = (B_{п.и}/a)^{1/\gamma_{гк}}. \qquad (3.169)$$

Сигналы (3.169) называются *нелинейными сигналами основных цветов* — это сигналы основных цветов, подвергнутые гамма-коррекции. Для них яркости свечения трех люминофоров кинескопа $Y_R = k_1 (E'_R)^{\gamma_к} = k_1 (R_{п.и}/a)^{\gamma_к/\gamma_{гк}} = (k_1/a) R_{п.и}$; $Y_G = (k_2/a) G_{п.и}$; $Y_B = (k_3/a) \times \times B_{п.и}$, если $\gamma_к = \gamma_{гк}$. Тогда яркость любого цвета $Ц$ приемника $Y = Y_R + Y_G + Y_B = (1/a)(k_1 R_{п.и} + k_2 G_{п.и} + k_3 B_{п.и})$.

При этом яркости Y_R, Y_G, Y_B будут находиться в отношении, при котором цветность цвета $Ц$ воспроизводится правильно, если $(k_1/a) = \alpha$; $(k_2/a) = \beta$; $(k_3/a) = \delta$. Тогда $Y = \alpha R_{п.и} + \beta G_{п.и} + \delta B_{п.и}$, что соответствует (3.80). В стандартных системах цветного телевидения для получения в приемнике сигналов E'_R, E'_G, E'_B в него подаются сигналы E'_Y, E_{R-Y}, E'_{B-Y} и из сигналов E'_{B-Y} и E'_{B-Y} создается сигнал E'_{G-Y}.

$$E'_Y = \alpha E'_R + \beta E'_G + \delta E'_B, \qquad (3.170)$$

где α, β, δ из (3.56). Сигналы E'_{R-Y} и E'_{B-Y} называются *цветоразностными*:

$$E'_{R-Y} = E'_R - E'_Y; \quad E'_{G-Y} = E'_G - E'_Y; \quad E'_{B-Y} = E'_B - E'_Y. \qquad (3.171)$$

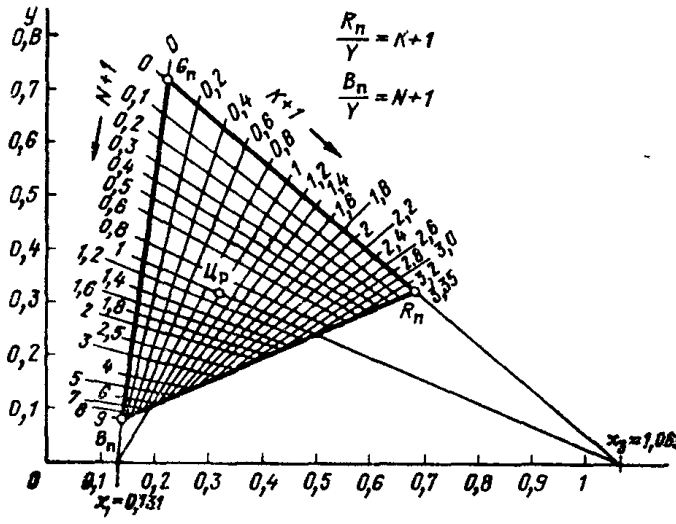


Рис. 3.32. Сетка прямых $R_п/Y$, $B_п/Y$ на диаграмме цветностей x, y для треугольника основных цветов приемника NTSC и белого C в качестве $Ц_р$

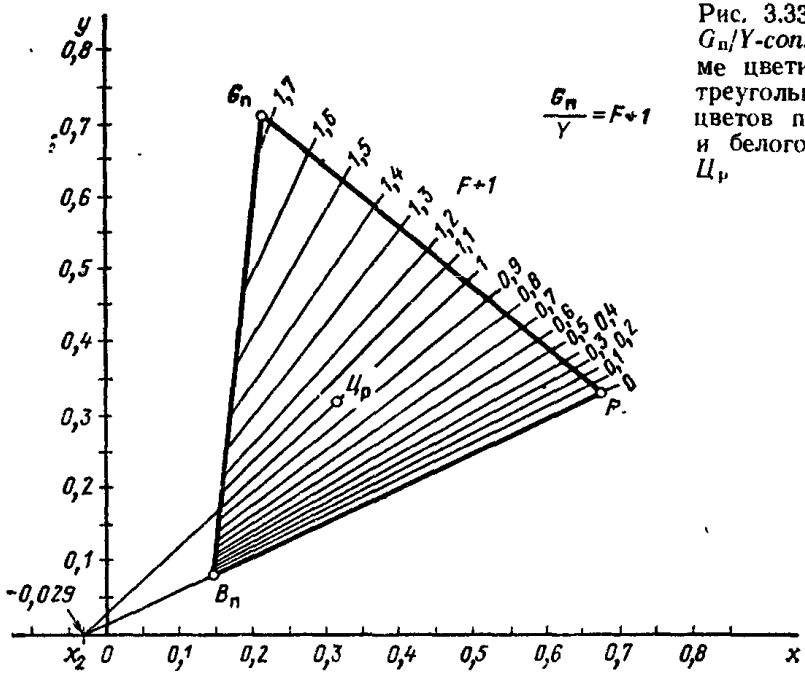


Рис. 3.33. Сетка прямых $G_п/Y$-*const* на диаграмме цветностей x, y для треугольника основных цветов приемника NTSC и белого C в качестве $Ц_р$

Тогда

$$E'_{R-Y}+E'_Y=E'_R;\quad E'_{G-Y}+E'_Y=E'_G;\quad E'_{B-Y}+E'_Y=E'_B. \tag{3.172}$$

Подставив (3.169) в (3.170), получим

$$E'_Y=\alpha(R_{п.и}/a)^{1/\gamma_{гк}}+\beta(G_{п.и}/a)^{1/\gamma_{гк}}+\delta(B_{п.и}/a)^{1/\gamma_{гк}}=$$
$$=(1/a)^{1/\gamma_{гк}}Y', \tag{3.173}$$

$$Y'=\alpha R_{п.и}^{1/\gamma_{гк}}+\beta G_{п.и}^{1/\gamma_{гк}}+\delta B_{п.и}^{1/\gamma_{гк}}=a^{1/\gamma_{гк}}E'_Y, \tag{3.174}$$

где Y' — яркость цвета $Ц$ в изображении на экране нелинейного кинескопа, созданная сигналом E'_Y.

Из (3.79) имеем

$$Y^{1/\gamma_{гк}}=(\alpha R_{п.и}+\beta G_{п.и}+\delta B_{п.и})^{1/\gamma_{гк}}. \tag{3.175}$$

Очевидно, что

$$Y'\neq Y^{1/\gamma_{гк}}. \tag{3.176}$$

Подставив (3.170) в (3.171), используя (3.169) и (3.137), получим

$$E'_{R-Y}=E'_R-(\alpha E'_R+\beta E'_G+\delta E'_B)=(1-\alpha)E'_R-\beta E'_G-\delta E'_B=$$
$$=(1-\alpha)(R_{п.и}/a)^{1/\gamma_{гк}}-\beta(G_{п.и}/a)^{1/\gamma_{гк}}-\delta(B_{п.и}/a)^{1/\gamma_{гк}}=$$
$$=(1/a)^{1/\gamma_{гк}}\left[(1-\alpha)R_{п.н}^{1/\gamma_{гк}}-\beta G_{п.н}^{1/\gamma_{гк}}-\delta B_{п.н}^{1/\gamma_{гк}}\right]=$$

$$= a' Y^{1/\gamma_{гк}} [(1-\alpha)(R_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}} - \beta (G_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}} -$$

$$-\delta (B_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}}; \qquad (3.177)$$

$$E'_{B-Y} = -\alpha E'_R - \beta E'_G + (1-\delta) E'_B = a' Y^{1/\gamma_{гк}} [-\alpha (R_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}} -$$

$$-\beta (G_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}} + (1-\delta)(B_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}}]. \qquad (3.178)$$

Для эталонного равностимульного цвета из (3.177) и (3.178) имеем

$$R_{п.и} = G_{п.и} = B_{п.и}; \; E'_{R-Y} = E'_{B-Y} = 0. \qquad (3.179)$$

Из (3.177) и (3.178) получим:

$$K' = E'_{R-Y}/(a' Y^{1/\gamma_{гк}}) = (1-\alpha)(R_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}} -$$

$$-\beta (G_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}} - \delta (B_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}}; \qquad (3.180)$$

$$N' = E'_{B-Y}/(a' Y^{1/\gamma_{гк}}) = -\alpha (R_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}} -$$

$$-\beta (G_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}} + (1-\delta)(B_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}}. \qquad (3.181)$$

Построив для $\gamma_{гк} = 2{,}75$ графики, подобные графикам на рис. 3.34 и 3.35, находим из них значения $(R_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}}$, $(G_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}}$ и $(B_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}}$ для различных точек внутри треугольника основных цветов приемника на диаграмме цветностей xy, из (3.180) и (3.181) находим K' и N' для этих точек. Соединим плавными кривыми точки с одинаковы-

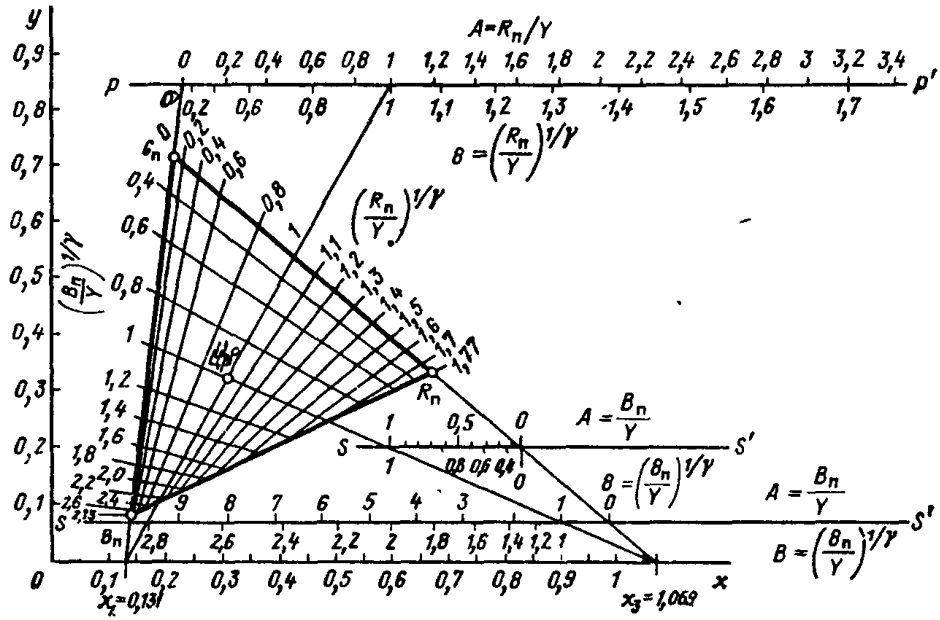


Рис 3.34. Сетка прямых $(R_п/Y)^{1/\gamma} = const$ и $(B_п/Y)^{1/\gamma} = const$ на диаграмме цветностей x, y для треугольника основных цветов приемника NTSC и белого C в качестве $Ц_р$ при $\gamma = 2{,}2$

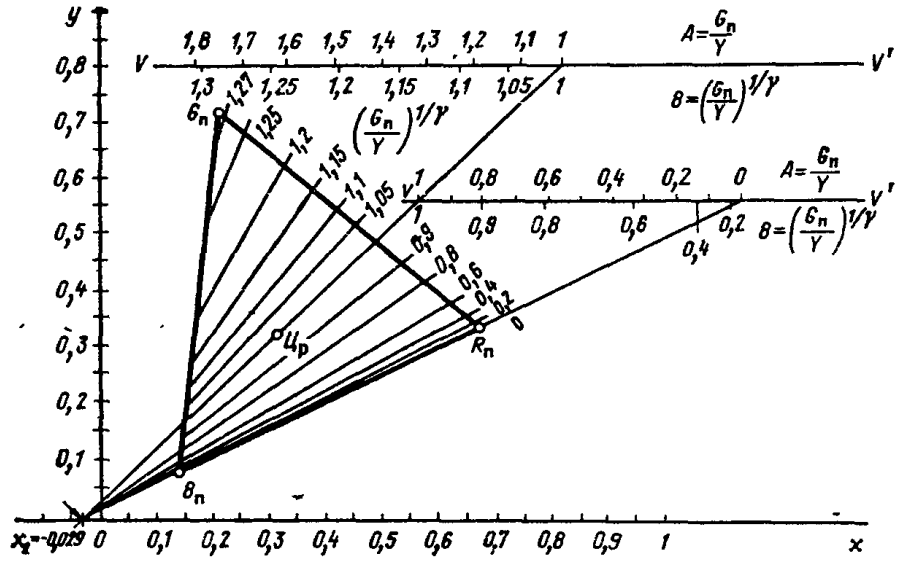


Рис. 3.35. Сетка прямых $(G_п/Y)^{1/\gamma}=const$ на диаграмме цветностей x, y для треугольника основных цветов приемника NTSC и белого C в качестве $Ц_р$ при $\gamma=2{,}2$

ми значениями K' и N', как показано на рис. 3.36. Заметим, что вблизи точки $Ц_р$ (для нее $K'=N'=0$) линии имеют меньшую кривизну, чем на насыщенных цветах.

Построение кривых постоянных значений нелинейных нормализованных цветоразностей K'' и N'' при $\gamma_к \neq 1$. Обозначим

$$R'_{п.и}=R^{1/\gamma_{гк}}_{п.и};\quad G'_{п.и}=G^{1/\gamma_{гк}}_{п.и};\quad B'_{п.и}=B^{1/\gamma_{гк}}_{п.и}. \tag{3.182}$$

При $\gamma_к \neq 1$ найдем

$$K''=(R''_{п.и}-Y')/Y'=(R'_{п.и}/Y')-1=$$
$$=(Y^{1/\gamma_{гк}}/Y')\,(R_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}}-1, \tag{3.183}$$
$$N''=(B'_{п.и}-Y')/Y'=(B'_{п.и}/Y')-1=$$
$$=(Y^{1/\gamma_{гк}}/Y')\,(B_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}}-1, \tag{3.184}$$

где Y и Y' заданы (3.180) и (3.174).

Можно построить линии постоянных значений K'' и N'' (рис. 3.37) следующим, число расчетным путем. Для этого напишем из (3.183) и (3.184)

$$R'_{п.и}=Y'(1+K'');\quad B'_{п.и}=Y'(1+N''), \tag{3.185}$$

Отсюда

$$R_{п.и}=(Y')^{\gamma_{гк}}(1+K'')^{\gamma_{гк}};\quad B_{л.м}=(Y')^{\gamma_{гк}}(1+N'')^{\gamma_{гк}}. \tag{3.186}$$

Для «зеленого» цветоразностного сигнала имеем $E'_{G\ Y}$ $E'_G - E'_Y$. Подставим сюда E'_G из (3.170) и после добавления к результату $(\alpha/\beta)\,E'_Y$ $(\alpha/\beta)\,E'_Y$ $(\delta/\beta)\,E'_Y - (\delta/\beta)\,E'_Y = 0$ получим путем простых преобразований

$$E'_{G\ Y} = -(-\alpha,\beta)\,E'_{R\ Y} - (\delta/\beta)\,E'_{B-Y}. \qquad (3.187)$$

Из (3.173) и (3.174) имеем $E'_Y = (1/a)^{1/\gamma_{гк}} Y'$,

на основании (3.169) имеем $E'_R = (R_{п.и}/a)^{1/\gamma_{гк}}$;

E'_B $(B_{п.и}/a)^{1/\gamma_{гк}}$; E'_G $(G_{п.и}/a)^{1/\gamma_{гк}}$ Подставим эти выражения в (3.187) и, помня, что $E'_{G\ Y} = E'_G$ E'_Y; $E'_{R\ Y} = E'_R - E'_Y$; $E'_{B\ Y}$ $E'_B - E'_Y$, получим

$$G'_{п.и} - Y' = -(\alpha/\beta)\,(R'_{п.и} - Y') - (\delta/\beta)\,(B'_{п.и} - Y'). \qquad (3.188)$$

Подставив (3.185) в (3.188), получим $G'_{п.и} - Y' = (-\alpha/\beta)\,K''Y' - (\delta/\beta)\,N''Y' - Y'|(\alpha/\beta)\,K'' + (\delta/\beta)N''|$,
отсюда

$$G'_{п.и} = Y'|1 - (\alpha,\beta)\,K'' - (\delta/\beta)\,N''|;$$

$$G_{п.и} = (G'_{п.и})^{\gamma_{гк}} = (Y')^{\gamma_{гк}}|1 - (\alpha/\beta)\,K'' - (\delta/\beta)\,N''|^{\gamma_{гк}}. \qquad (3.189)$$

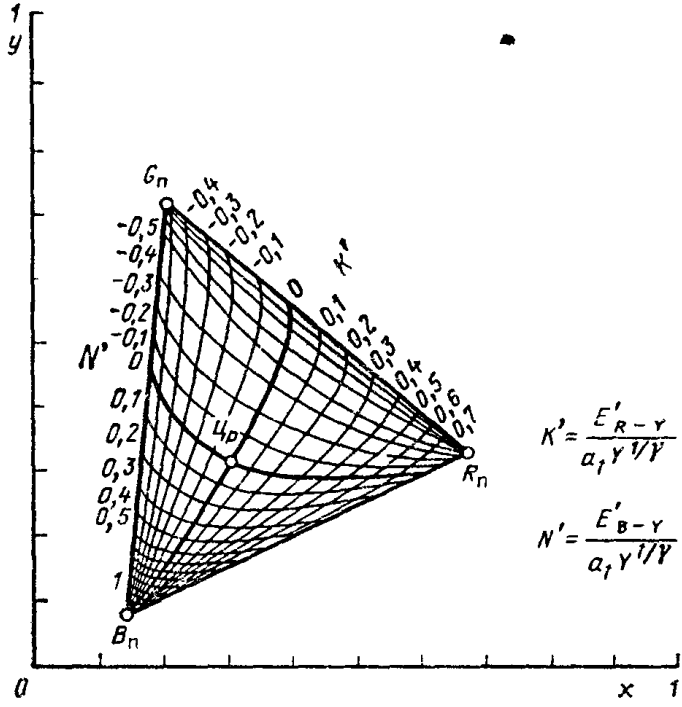


Рис. 3.36. Линии постоянных значений K' и N' для треугольника основных цветов приемника NTSC и белого C в качестве $Ц_р$ при $\gamma = 2{,}75$

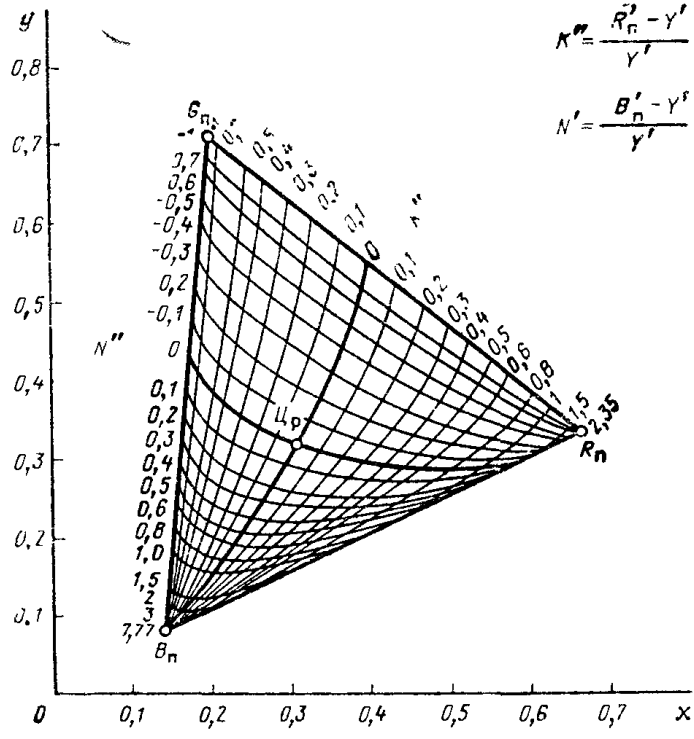


Рис. 3.37. Линии постоянных значений K'' и N'' для треугольника осиовных цветов приемника NTSC и белого C в качестве $Ц_р$ при $\gamma = 2{,}2$

Подставив (3.186) и $G_{п.и}$ из (3.189) в формулу, аналогичную (2.192), получим при $\gamma_{гк} = \gamma_к$:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \tilde{\mathbf{A}}_0^{-1} \begin{pmatrix} R_{п.и} \\ G_{п.и} \\ B_{п.и} \end{pmatrix} = \tilde{\mathbf{A}}_0^{-1} (Y')^{\gamma_к} \begin{pmatrix} (1 \quad)^{\gamma_к} \\ (1 \quad \beta) K'' \quad (\delta \beta) N''^{\gamma_к} \\ (1 + N'')^{\gamma_к} \end{pmatrix}. \tag{3.190}$$

Множитель $(Y')^{\gamma_к}$ можно перенести в левую часть (3.190), как $(Y')^{-\gamma_к}$. Задаемся значениями K'' и для разных значений N'' из (3.190), находим X, Y, Z, умноженные на $(Y')^{\gamma_к}$, и по ним находим координаты цветности x, y, z. Затем задаемся другим значением K'' и повторяем расчет. Таким образом, получаем линии постоянных значений K''. Затем задаемся значением N'' и для разных значений K'' находим X, Y, Z и по ним находим x, y, z. Повторяем расчет для другого значения N'' и т. д., получаем линии постоянных значений N''.

На рис. 3.37 представлены сетки кривых K'' и N''. Значения K'' и N'' для вершин треугольника NTSC берем из табл. 3.14.

Равностимульный цвет $Цр$ на рис. 3.37 представлен точкой пересечения кривых, для которых $K'' = N'' \quad 0$. На рис. 3.38 приведены линии постоянных значений K'' и N'', построенные на равноконтрастной диаграмме МКО — 1960 г. В области насыщенных цветов эти линии

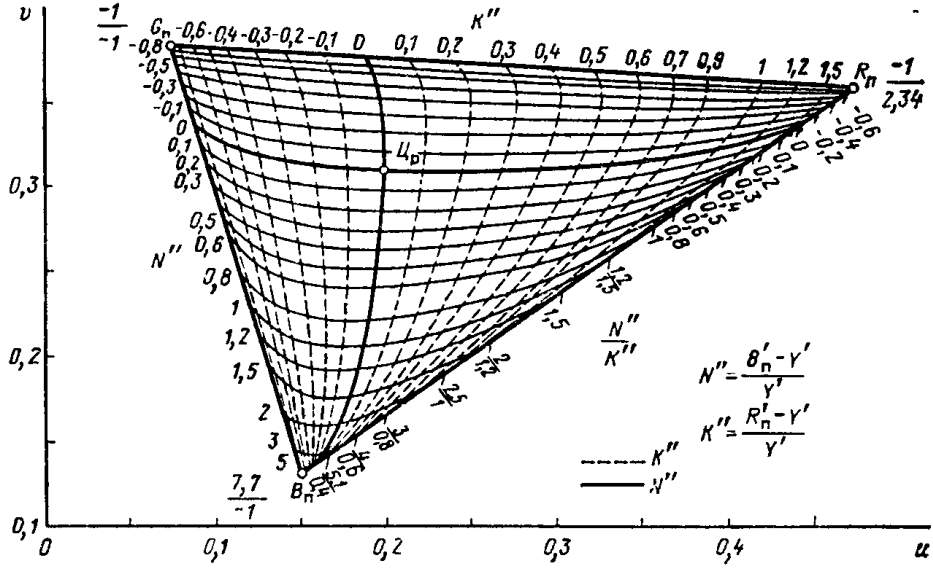


Рис. 3.38. Линии постоянных значений K'' и N'' на диаграмме u, v МКО—1960 г. для треугольника основных цветов приемника NTSC и белого C в качестве $Ц_р$ при $\gamma=2{,}2$ (по Таунсенду)

приближаются к сторонам треугольника NTSC асимптотически, что снижает точность определения K'' и N'' с помощью этого графика.

Значения K'' и N'' для построения сетки на рис. 3.37 можно найти и другим методом. Для точек, лежащих внутри треугольника основных цветов приемника, значения $(R_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}}$ и $(B_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}}$ находим из рис. 3.34 при $\gamma_{гк}=2{,}2$, значения $(Y')^{\gamma_к}/Y=K_C$ находим из рис. 4.16, далее определяем $K_C^{1/\gamma_{гк}}-Y'/Y^{1/\gamma_{гк}}$ и затем находим $Y^{1/\gamma_{гк}}/Y'=1/K_C^{1/\gamma_{гк}}$ при $\gamma_к=\gamma_{гк}$. Это позволяет найти K'' и N'', используя (3.183) и (3.184). Соединяя плавными кривыми точки с одинаковым значением K'', получаем сетку кривых K'' – const. Аналогично получаем сетку кривых N'' – const. Эти сетки представлены на рис. 3.37. По изложенной выше методике можно построить для треугольника ЕС из табл. 3.4 и белого D_{65} в качестве $Ц_р$ диаграммы, аналогичные рис. 3.29 ... 3.38.

3.9. ЦВЕТОВОЙ БАЛАНС В ПРИЕМНИКЕ

Общие положения. Сохранение неизменной цветности изображения однородного белого поля при регулировке его яркости в отсутствие видеосигналов на электродах трехцветного кинескопа называется *статическим балансом белого.* Сохранение неизменной цветности на всех ступенях изображения серой шкалы на экране трехцветного кинескопа при подаче на него видеосигналов и регулировке кон-

трастности (ручки регулировки яркости изображения не используют) или яркости изображеиия (ручку регулировки контрастности не используют) называется *динамическим балансом белого.*

Для определения средств достижения баланса белого прежде всего рассмотрим работу цветного кинескопа [121, 122].

Модуляционная характеристика кинескопа $I_к = f(e_{м.к})$ показана на рис. 3.39, где $I_к$ — ток электронного луча в прожекторе; $e_{м.к}$ — напряжение на модуляторе прожектора относительно его катода. Напряжение видеосигнала $E_с$ подается на модулятор с позитивной полярностью (уровень белого выше уровня черного). При этом модуляцию тока электронного луча называют *сеточной* (модулятор иногда называется управляющим электродом или управляющей сеткой). Напряжение $u_з$ — *напряжение запирания электронного луча* (т. е. $I_к = 0$ при $e_{м.к} = u_з$, где $e_{м.к} < 0$). Для функции $I_к = f(e_{м.к})$ известны формулы Х. Мосса, Л. Алларда, и др. Формула Х. Мосса

$$I_к = KE_с^{3,5}/u_з^2, \tag{3.191}$$

где мгновенное значение сигнала $E_с$ отсчитывается от напряжения запирания, K — *коэффициент качества* прожектора имеет размерность проводимости, ампер/(вольт) $^{1/5}$, причем $K = I_{а0}/u_з^{3/2}$, где $I_{а0}$ — ток последнего анода прожектора при $e_{м.к} = 0$. При работе с пространственным зарядом $K \approx 3 \cdot 10^{-6}$, если $E_с$ и $u_з$ — в вольтах, а $I_к$ и $I_{а0}$ — в амперах. Подставляя в (3.191) $K = 3$, получим $I_к$, мкА. В тетродном прожекторе напряжение запирания

$$u_з = pu_{а1}, \tag{3.192}$$

где $u_{а1}$ —напряжение на первом аноде (экранной сетке) прожектора, p — проницаемость этой сетки. Обычно $p = 0{,}2 \ldots 0{,}4$. Берут $p = 0{,}36$.

Из (3.191) и (3.192) крутизна модуляционной характеристики

$$S = dI_к/dE_с = 3{,}5KE_с^{2,5}u_з^{-2} = 3{,}5\,KE_с^{2,5}p^{-2}\,u_{а1}^{-2} \tag{3.193}$$

зависит от $E_с$ и $u_з$. Модуляционные характеристики электронного прожектора рис. 3.40 рассчитаны по (3.191) и (3.192) при $p = 0{,}36$ и $e_{м.к} = u_1 = -u_з + E_с$ и разных значениях $u_{а1}$. Здесь же показана линия $e_{м.к} = 0$, выше которой появляется ток модулятора, что недопустимо. Яркость свечения люминофора кинескопа

$$L = aI_л = aK_{п.м}I_к, \tag{3.194}$$

где $I_л$ — ток электронного луча, приходящего на люминофор для воз-

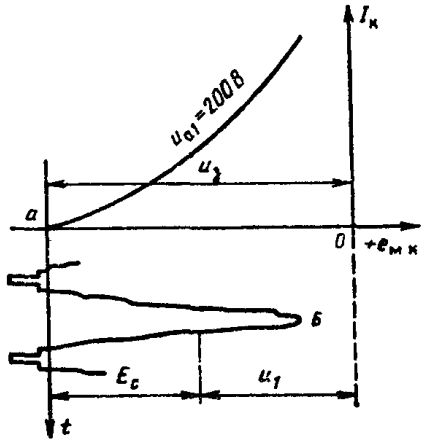


Рис. 3.39. Модуляционная характеристика $I_к = f(e_{мк})$ прожектора кинескопа при заданиом зиачении $u_{а1}$

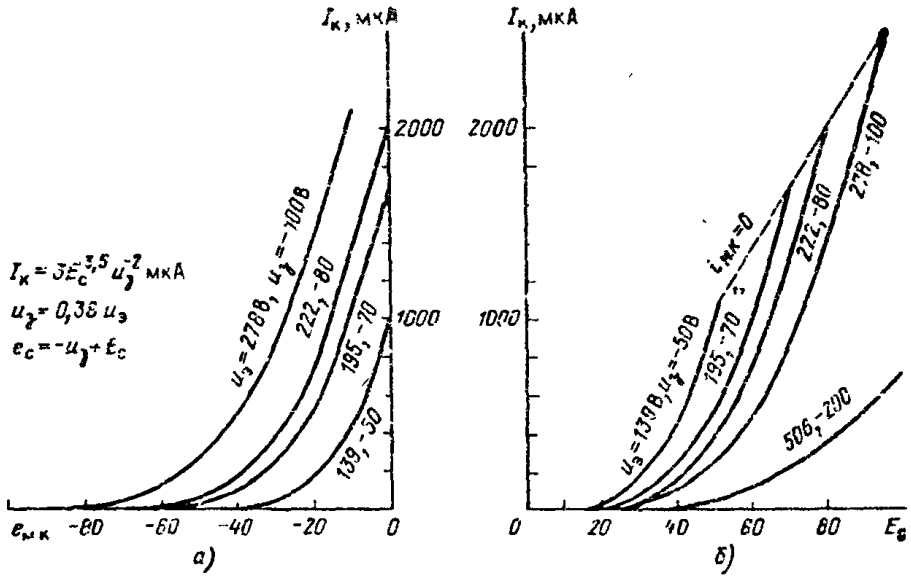


Рис. 3.40 Характеристики тетродного прожектора, рассчитанные по формуле Х. Мосса при $n=3{,}5$

буждения его свечения, a — величина, зависящая от светоотдачи люминофора, $K_{п.м}$ — коэффициент, зависящий от конструкции прожектора и прозрачности для электронов теневой маски цветного кинескопа с такой маской.

Подставив (3.191) в (3.194), получим

$$L = S_1 E_c^{\gamma_к}, \tag{3.195}$$

где $S_1 = aK_{п.м}K/u_э^2$. Если $\gamma_к$ — const (коэффициент «гамма» кинескопа), то крутизна модуляционной характеристики $L = f(E_c)$

$$S' = dL/dE_c = S_1 \gamma_к E_c^{\gamma_к - 1}. \tag{3.196}$$

Однако в практике обычно $\gamma_к \neq$ const, а зависит от E_c.

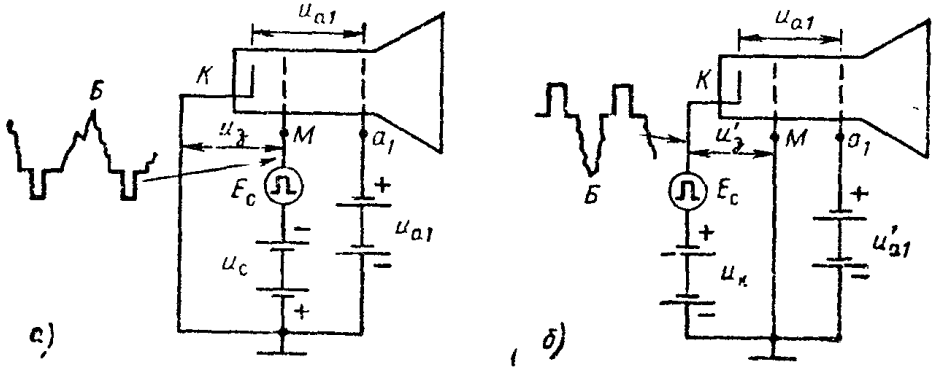


Рис 3.41. Схемы подачи сигнала E_c на прожектор кинескопа с модуляцией:

а — сеточной; *б* — катодной

При сеточной модуляции кинескопа (рис. 3.41, *а*) должно быть: $u_c = u_з$, где $u_з$ — напряжение на модуляторе относительно катода; при этом $u_з < 0$, $u_c < 0$; $E_c > 0$ (отсчет E_c от $u_з$), $u_1 < 0$ (отсчет u_1 от $e_{м\text{-}к} = 0$). При этом $|E_c| = |u_з| - |u_1|$, а если брать E_c, $u_з$ и u_1 с их знаками, то $E_c = u_1 - u_з$.

Пример. Дано $u_1 = -40$ В; $E_c = 30$ В. Получим $u_з = u_1 - E_c = -40 - 30 = -70$ В; $u_c = -70$ В, причем $u_{a1} = u_c + 0{,}36 = -70 + 0{,}36 = 194$ В.

При катодной модуляции (рис. 3.41, *б*) модуляционная характеристика показана на (рис. 3.42): должно быть $u_{a1} = u'_{a1} - u_к$; $u_к = u'_з$, где $u'_з$ — напряжение на катоде относительно модулятора; $u'_з > 0$; $u_к > 0$; $E_c < 0$ (отсчет E_c от $u'_з$), $u'_1 > 0$ (отсчет u'_1 от $e_{к.м} = 0$). При этом $|E_c| = |u'_з| - |u'_1|$, а если брать E_c, $u'_з$ и u'_1 с их знаками, то $E_c = u'_1 - u'_з$.

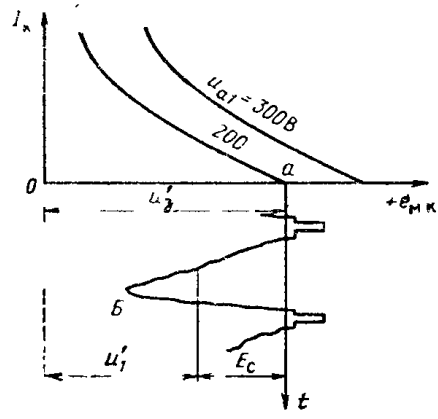


Рис. 3.42. Модуляционная характеристика прожектора кинескопа при катодной модуляции

Пример. Дано $u'_1 = 40$ В; $u'_з = 70$ В. Получим $u_к = u'_з = 70$ В; $E_c = u'_1 - u'_з = 40 - 70 = -30$ В.

При сеточной и катодной модуляциях значения $\gamma_к$ разные. При $E_c = 0$ в обоих случаях $\gamma_к = 2{,}5$, но с ростом E_c растет $\gamma_к$ и изменяется в пределах 2,5 ... 3.5 при сеточной модуляции и 2,5 ... 2,8 — при катодной. Из сравнения модуляционных характеристик (рис. 3.43 и 3.44) следует, что при катодной модуляции крутизна характеристики больше, т. е. изменение тока $I_к$ при одном и том же значении сигнала E_c больше, а чувствительность кинескопа выше. Вследствие сложности зависимости тока $I_к$ от параметров катода, геометрии прожектора, напряжений на его электродах, получить одинаковые модуляционные характеристики трех прожекторов в цветном кинескопе обычно можно только приближенно.

Гамма-коррекция. Если передающая трубка ПТ не является линейным преобразователем света в видеосигнал (имеет показатель нелинейности $\gamma_{п.тг} < 1$), то по аналогии с (3.19) сигналы на ее выходе (см. рис. 1.8)

$$E_R = a_R (R_{п.о})^{\gamma_{п.тR}}; \quad E_G = a_G (G_{п.о})^{\gamma_{п.тG}}; \quad E_B = a_B (B_{п.о})^{\gamma_{п.тB}}. \qquad (3.197)$$

С учетом (3.197) по аналогии с (3.26) сигналы на выходе гамма-корректора:

$$E'_R = E_R^{1/\gamma_{гкR}} = [a_R (R_{п.о})^{\gamma_{п.тR}}]^{1/\gamma_{гкR}} = a_R^{1/\gamma_{гкR}} (R_{п.о})^{\gamma_{п.тR}/\gamma_{гкR}};$$

$$E'_G = E_G^{1/\gamma_{гкG}} = [(a_G (G_{п.о})^{\gamma_{п.тG}}]^{1/\gamma_{гкG}} = a_G^{1/\gamma_{гкG}} (G_{п.о})^{\gamma_{п.тG}/\gamma_{гкG}};$$

$$E'_B = E_B^{1/\gamma_{гкB}} = [a_B (B_{п.о})^{\gamma_{п.тB}}]^{1/\gamma_{гкB}} = a_B^{1/\gamma_{гкB}} (B_{п.о})^{\gamma_{п.тB}/\gamma_{гкB}}, \qquad (3.198)$$

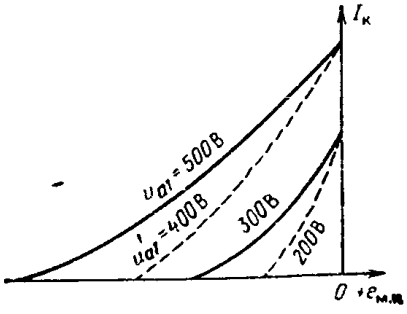


Рис. 3.43. Модуляционные характеристики в линейном масштабе (———— сеточная, — — — катодная модуляции)

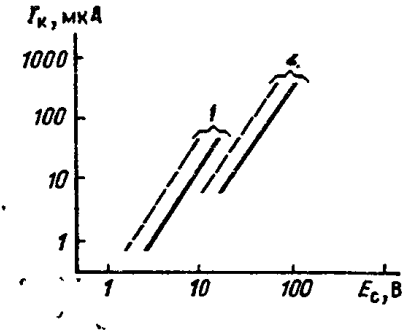


Рис. 3.44. Модуляционные характеристики тетродного прожектора: *1* — $u_{a1} = u'_{a1} = 50$ В, $\gamma_к = 2{,}8$; *2* — при $u_{a1} = u'_{a1} = 400$ В. $\gamma_к = 2{,}6$

где $\gamma_{гк} > 1$. По аналогии с (3.28) яркости основных цветов в изображении на экране кинескопа

$$L_{Rи} = A_R (E'_R)^{\gamma_{кR}} = A_R a_R^{\gamma_{кR}/\gamma_{гкR}} (R_{п.о})^{\gamma_{п.тR}\gamma_{кR}/\gamma_{гкR}};$$

$$L_{Gи} = A_G (E'_G)^{\gamma_{кG}} = A_G a_G^{\gamma_{кG}/\gamma_{гкG}} (G_{п.о})^{\gamma_{п.тG}\gamma_{кG}/\gamma_{гкG}};$$

$$L_{Bи} = A_B (E'_B)^{\gamma_{кB}} = A_B a_B^{\gamma_{кB}/\gamma_{гкB}} (B_{п.о})^{\gamma_{п.тB}\gamma_{кB}/\gamma_{гкB}}, \qquad (3.199)$$

где $\gamma_к > 1$.

Для неискаженной цветопередачи должно соблюдаться условие (3.32), для чего показатели степени при $R_{п.о}$, $G_{п.о}$, $B_{п.о}$ должны быть равны единице, что достигается подбором $\gamma_{гкR}$, $\gamma_{гкG}$, $\gamma_{гкB}$, т. е. должно быть выполнено условие

$$\gamma_{п.тR}\gamma_{кR} = \gamma_{гкR}; \quad \gamma_{п.тG}\gamma_{кG} = \gamma_{гкG}; \quad \gamma_{п.тB}\gamma_{кB} = \gamma_{гкB}. \qquad (3.200)$$

Тогда из (3.199) и (3.200)

$$L_{Rи} = k_1 R_{п.о}; \quad L_{Gи} = k_2 G_{п.о}; \quad L_{Bи} = k_3 B_{п.о}, \qquad (3.201)$$

если $A_R a_R^{\gamma_{кR}/\gamma_{гкR}} = k_1$; $A_G a_G^{\gamma_{кG}/\gamma_{гкG}} = k_2$;

$$A_B a_B^{\gamma_{кB}/\gamma_{гкB}} = k_3. \qquad (3.202)$$

Из (3.21) следует $L_{Rи} = L_{(Rи)} R_{п.и}$; $L_{Gи} = L_{(Gи)} G_{п.и}$; $L_{Bи} = L_{(Bи)} B_{п.и}$. Подставив эти выражения в (3.201), получим

$$R_{п.и} = (k_1/L_{(Rи)}) R_{п.о} = kR_{п.о}; \quad G_{п.и} = (k_2/L_{(Gи)}) G_{п.о} = kG_{п.о};$$

$$B_{п.и} = (k_3/L_{(Bи)}) B_{п.о} = kB_{п.о}, \qquad (3.203)$$

если $k_1/L_{(Rи)} = k_2/L_{(Gи)} = k_3/L_{(Bи)} = k$, $\qquad (3.204)$

то искажений цветопередачи не будет, так как выполняется, (3.15). Условия (3.200) и (3.204) соответствуют (3.9) и (3.13).

Пример. Покажем влияние $\gamma_{кR}$, $\gamma_{кG}$, $\gamma_{кB}$ на цветность изображения. Пусть $E'_R = 0{,}5$ В; $E'_G = 1$ В, $E'_B = 0$. Тогда при $\gamma_{кR} = \gamma_{кG} = \gamma_{кB} = 1$ и $A_R = A_G = A_B = 1$ имеем из (3.199) $L_{Rи} = 0{,}5$; $L_{Gи} = 1$; $L_{Bи} = 0$, так что отношение $L_{Gи}/L_{Rи} = 1/0{,}5 = 2$, что дает зеленовато-желтый цвет смеси со слабым преобладанием зеленого. При $\gamma_{кR} = \gamma_{кG} = \gamma_{кB} = 2$ имеем $L_{Rи} = 0{,}5^2 = 0{,}25$; $L_{Gи} = 1^2 = 1$; $L_{Bи} = 0$, так что отношение $L_{Gи}/L_{Rи} = 1/0{,}25 = 4$, что дает значительное преобладание зеленого.

Условие (3.200) предполагает постоянство величин $\gamma_{п.т}$, $\gamma_к$, $\gamma_{гк}$ с индексами R, G, B в рабочем диапазоне яркостей передаваемой сцены и изображения. Однако в практике это условие соблюдается весьма приближенно, и поэтому следует так выбирать режим работы нелинейных приборов, чтобы отклонение значений $\gamma_{п.т}$, $\gamma_к$, $\gamma_{гк}$ от номинального были малыми (не более ± 4 %). Также отметим, что при больших токах луча в кинескопе может наступить насыщение яркости по току (уменьшение свегоотдачи люминофоров), что внесет искажения в цветопередачу.

Пример. Покажем, как искажается цветность изображения при отсутствии гамма-корректора. Пусть $R_{п.о} = 0{,}9$; $G_{п.о} = 0{,}4$; $B_{п.о} = 0$. Если $\gamma_{п.т} = \gamma_{кг} = 1$ (с индексами R, G, B), то при $\gamma_{кR} = \gamma_{кG} = \gamma_{кB} = 2{,}2$ получим из (3.21), (3.199), (3.202) $R_{п.и} = (k_1 L_{(Rи)}) R_{п.о}^{\gamma_{кR}}$; $G_{п.и} = (k_2 L_{(Gи)}) G_{п.о}^{\gamma_{кG}}$; $B_{п.и} = (k_3/L_{(Bи)}) B_{п.о}^{\gamma_{кB}}$. Для простоты примем $(k_1 L_{(Rи)}) = (k_2 L_{Gи}) = (k_3 L_{B(и)}) = 1$. Тогда имеем $R_{п.и} = 0{,}9^{2{,}2}$; $G_{п.и} = 0{,}4^{2{,}2}$; $B_{п.и} = 0$. Модули цвета передаваемой сцены и цвета изображения $m_о = 0{,}9 + 0{,}4 + 0 = 1{,}3$; $m_и = 0{,}9^{2{,}2} + 0{,}4^{2{,}2} + 0 = 0{,}80 + 0{,}13 = 0{,}93$. Отсюда координаты цветности сцены $r_о = R_{п.о}/m_о = 0{,}9/1{,}3 = 0{,}69$; $g_о = G_{п.о}/m_о = 0{,}4/1{,}3 = 0{,}31$; координаты цветности изображения $r_и = R_{п.и}/m_и = 0{,}80/0{,}93 = 0{,}86$; $g_и = G_{п.и}/m_и = 0{,}13/0{,}93 = 0{,}14$, т. е. цвет изображения имеет сдвиг цветового тона в область красиого (ближайшего основного цвета) и увеличивается его насыщеиность.

Во избежание искажений цветности в цветном кинескопе следует ручной регулировкой яркости так устанавливать смещение на модуляторе при сеточной модуляции, чтобы при отсутствии сигнала яркость изображения была равна нулю, как показано на рис. 3.45, т. е. чтобы уровню черного в сигнале соответствовало запирание электронного луча (см. рис. 3.39, $u_1 = u_3$). Это условие нарушается при внешней засветке экрана кинескопа, что приводит к искажениям цветности темных участков изображения (потере насыщенности и искажению цветового тона). В настоящее время принято $\gamma_к = 2{,}8$ для трех прожекторов цвет-

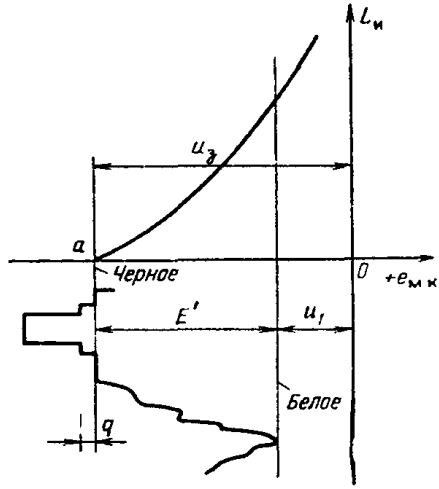


Рис. 3.45. Модуляционная характеристика кинескопа, когда уровню черного в передаваемом сигнале соответствует черное в изображении ($q > 0$)

ного кинескопа. В практике иногда не соблюдают условие (3.200) и берут $\gamma_{\text{и.т}}\gamma_{\text{к}}/\gamma_{\text{гк}}$ 1,4 для увеличения изменений яркости на светлом и сером относительно изменений яркости на темном, что нарушает колориметрическую верность цветопередачи. Гамма-корректор должен при изменениях $\gamma_{\text{гк}}$ сохранять размах выходного сигнала на белом цвете в передаваемой сцене.

Цветовой баланс. Статический и динамический балансы белого цвета определяются для центра экрана кинескопа работой его электронных прожекторов и люминофоров, а для всего экрана также и точностью установки однородности цветности каждого основного цвета по всей площади экрана (чистотой цвета).

Если $L_{Ц\text{н}}$ — яркость цвета $Ц$ в изображении, то из (3.74) имеем

$$L_{Ц\text{н}} = L_{R\text{н}} + L_{G\text{н}} + L_{B\text{н}};\ \alpha_Ц \quad L_{R\text{н}}/L_{Ц\text{н}};\ \beta_Ц = L_{G\text{н}}/L_{Ц\text{н}};$$

$$\delta_Ц - L_{B\text{н}}/L_{Ц\text{н}};\ \alpha_Ц + \beta_Ц + \delta_Ц \quad 1, \tag{3.205}$$

тогда

$$L_{R\text{н}} : L_{G\text{н}} : L_{B\text{н}} = \alpha_Ц : \beta_Ц : \delta_Ц. \tag{3.206}$$

Условие (3.206) должно соблюдаться для цветового баланса любого цвета $Ц$ независимо от яркости и контрастности изображения. Для его выполнения необходимо, чтобы модуляционные характеристики трех электронных прожекторов кинескопа были одинаковыми, а токи лучей при получении эталонного белого цвета равными друг другу при всех значениях яркости этого белого цвета, чтобы можно было использовать одинаковые участки модуляционных характеристик. Тогда необходимую цветность изображения получают подбором светоотдач люминофоров (для получения (3.206)). Однако на практике светоотдачи люминофоров не отвечает этому условию, и поэтому условие (3.206) достигается на эталонном белом цвете подбором токов трех электронных лучей $I_{лR}$, $I_{лG}$, $I_{лB}$.

Излучаемый люминофором световой поток $F = \sigma P_л$, где σ — светоотдача люминофора, лм/Вт; $P_л \quad I_л U_{а2}$ — мощность электронного луча, $I_л$ — ток луча, $U_{а2}$ — напряжение на втором аноде кинескопа. Яркость свечения люминофора $L = F/(\pi S_р)$, где $S_р$ — площадь растра. Отсюда $L = \sigma I_л v_{а2}/(\pi S_р) = M\sigma I_л$, где $M = v_{а2}/(\pi S_р)$ — постоянный коэффициент, одинаковый для трех люминофоров, создающих цвета $R_п$, $G_п$, $B_п$. Отсюда следует

$$L_{R\text{н}} = M\sigma_R I_{лR};\ L_{G\text{н}} = M\sigma_G I_{лG};\ L_{B\text{н}} = M\sigma_B I_{лB}. \tag{3.207}$$

Разделив правую часть (3.206) на $\beta_Ц$, имеем $L_{R\text{н}}:L_{G\text{н}} : L_{B\text{н}} = (\alpha_Ц\ \beta_Ц) : 1 : (\delta_Ц/\beta_Ц)$, откуда, используя (3.207), получим $I_{лR}\sigma_R : I_{лG}\sigma_G : I_{лB}\sigma_B \quad (\alpha_Ц/\beta_Ц):1 : (\delta_Ц/\beta_Ц)$. Отсюда следует:

$$\frac{I_{лR}\sigma_R}{I_{лG}\sigma_G} = \frac{\alpha_Ц}{\beta_Ц};\ \frac{I_{лB}\sigma_B}{I_{лG}\sigma_G} = \frac{\delta_Ц}{\beta_Ц};$$

$$\frac{I_{лR}}{I_{лG}} \quad \frac{\sigma_G \alpha_Ц}{\sigma_R \beta_Ц};\ \frac{I_{лB}}{I_{лG}} = \frac{\sigma_G \delta_Ц}{\sigma_B \beta_Ц}. \tag{3.208}$$

Пример Если в качестве эталонного цвета взять белый цвет C, то при основных цветах приемника NTSC (см. табл. 3.4) имеем $\alpha_Ц = 0{,}30$; $\beta_Ц = 0{,}59$; $\delta_Ц = 0{,}11$. Если принять $\sigma_K = 9$ лм/Вт; $\sigma_G = 40$ лм/Вт; $\sigma_B = 8$ лм/Вт, то на белом C получим $I_{лR}/I_{лG} = 2{,}26$; $I_{лB}/I_{лG} = 0{,}94$, т. е. $I_{лG} \approx I_{лB}$, а $I_{лR} \gg I_{лG}$.

Для уменьшения влияния изменений яркости изображения на его цветность следует создавать такой режим работы электронных прожекторов, при котором их *нормализованные модуляционные характеристики* близки друг к другу, а условие (3.206) выполнялось подбором размахов трех сигналов E'_B, E'_G, E'_B, напряжений запирания и постоянных смещений E_0 на модуляторах (или катодах). При этом рабочие участки трех модуляционных характеристик могут быть различными.

Нормализованными называются модуляционные характеристики, построенные в относительных шкалах, для которых за единицу (или 100 %) приняты токи лучей, соответствующие белому эталонному цвету с максимальной яркостью, и напряжение запирания $u_з$ или размах сигнала от черного до белого, соответствующий $I_л = 1$ (т. е. 100%), как показано на рис. 3.46 для трех прожекторов при $\gamma_{кB} > \gamma_{кG} > \gamma_{кR}$. Допускается расхождение трех модуляционных характеристик не более 2 ... 3%. На темном их совпадение должно быть точнее, поэтому точки запирания трех лучей должны устанавливаться весьма тщательно.

Известны следующие способы подачи видеосигналов на электроды трехцветного кинескопа:

1) сигналы E'_R, E'_G, E'_B — на модуляторы;

2) сигналы $-E'_R$, $-E'_G$, $-E'_B$ — на катоды кинескопа;

3) сигналы E'_{R-Y}, E'_{G-Y}, E'_{B-Y} — на модуляторы кинескопа и одновременно с ними сигнал яркости $-E'_Y$ — на три катода кинескопа. В этом способе электронные лучи модулируются сигналами $E'_{R-Y} + E'_Y = E'_R$; $E'_{G-Y} + E'_Y = E'_G$; $E'_{B-Y} + E'_Y = E'_B$. Цветоразностные сигналы — узкополосные (обычно 0,5 ... 1,5 МГц), поэтому усилить их до необходимого значения (70 ... 120 В) проще, хотя максимальный размах сигналов E'_{R-Y} и E'_{B-Y} больше, чем сигналов E'_R, E'_G, E'_B, E'_Y (1,4 и 1,78 соответственно, если принять за

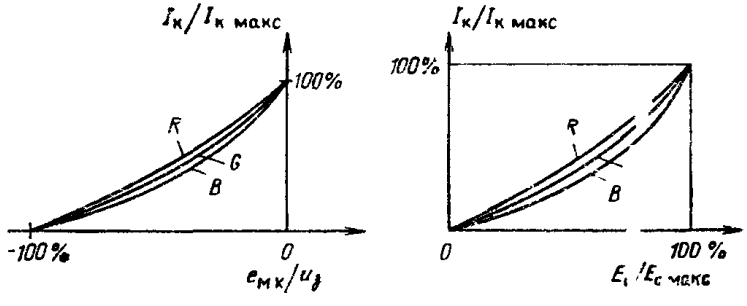


Рис. 3.46. Нормализованные модуляционные характеристики прожекторов кинескопа (в линейных шкалах)

единицу размах сигналов E'_R, E'_G, E'_B на белом C. Размах сигнала E'_{G-Y} равен 0,82). При подаче цветоразностных сигналов труднее получить стабильный цветовой баланс, так как $\gamma_к$ различны для сеточной и катодной модуляций. Так как крутизна модуляционной характеристики при катодной модуляции больше, чем при сеточной (при том же напряжении на первом аноде относительно шасси), то при сеточной модуляции размах сигнала должен быть примерно в 1,2 раза больше, чем при катодной.

Пример Если на катод подается сигнал E'_Y с относительным размахом 1, то цветоразностные сигналы на модуляторах должны иметь относительные размахи E'_{R-Y} 1,4·1,2 1,68; E'_{B-Y} 1,78·1,2 2,15.

Для правильной цветопередачи сигналы, подаваемые на кинескоп, должны иметь постоянную составляющую, которая обычно восстанавливается в сигналах E'_R, E'_G, E'_B на электродах кинескопа. Сигнал E'_Y передается от видеодетектора на катоды кинескопа без потери постоянной составляющей или же она восстанавливается в нем на катодах кинескопа. Цветоразностные сигналы передаются от детекторов сигналов цветности на модуляторы кинескопа без потери постоянной составляющей или же она восстанавливается в них на модуляторах кинескопа, причем здесь применяются фиксирующие схемы (управляемые диоды), действующие во время строчного обратного хода (так как эти сигналы биполярные) или применяются неуправляемые диоды для сигналов E'_R, E'_G, E'_B, действующих между модуляторами и катодами. Из рис. 3.40 следует, что можно получать разные токи луча при постоянном размахе сигнала E'_c подбором напряжений u_{a1} на первом аноде прожектора или размаха E'_c при постоянном значении u_{a1}. Из рис. 3.40 и (2.207) следует, что крутизна S модуляционной характеристики уменьшается с ростом напряжения на первом аноде u_{a1}. Из данного выше примера следовало, что на белом $I_{лR} > I_{лG} > I_{лB}$. Поэтому необходимо выполнять условие $u_{a1B} > u_{a1G} > u_{a1R}$, т. е. $u_{лR} > u_{лG} > u_{лB}$ (рис. 3.47).

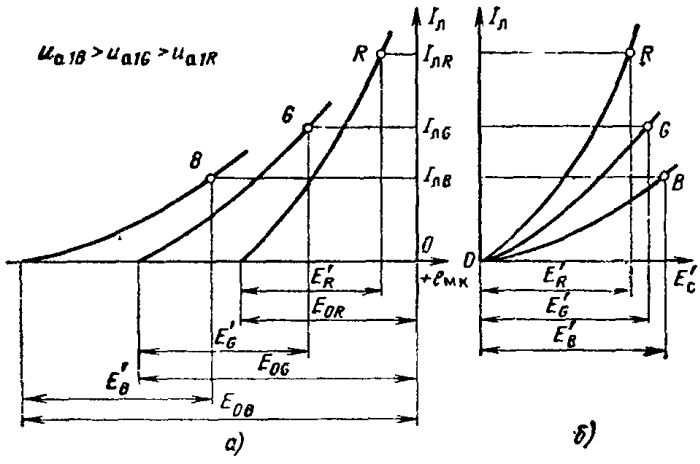


Рис. 3.47. Точка максимальных значений токов электронных лучей на модуляционных характеристиках трех прожекторов при разных напряжениях запирания

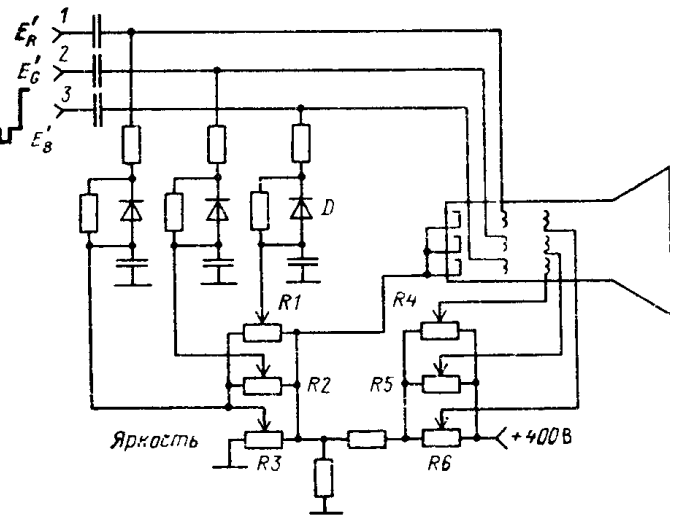


Рис. 3.48. Схема включения трехцветного кинескопа при подаче сигналов основных цветов E'_R, E'_G, E'_B (регулировка потенциалов модулирующего электрода и первого анода)

В масочном цветном кинескопе напряжение запирания $u_{зВ}$ может доходить до — 200 В; $u_{а1} = 200 \ldots 500$ В; на втором аноде $u_{а2} = -20 \ldots 27$ кВ, на фокусирующем электроде 4 ... 5 кВ.

Методы установки баланса белого цвета. В качестве белого цвета, на котором должен быть достигнут цветовой баланс, выбирается цвет D_{65}. Этот цвет свечения экрана кинескопа не должен изменяться при изменениях сигнала яркости на выходе видеодетектора приемника. При регулировке цветового баланса обычно используется испытательный сигнал серой шкалы, который подается на цепь включения кинескопа вместо сигнала яркости E'_Y или вместо сигналов основных цветов E'_R, E'_G, E'_B. При этом цветность белого D_{65} на всех ступенях яркости изображения серой шкалы на экране должна в результате установки цветового баланса сохраняться неизменной. Применяются два метода такой установки.

Метод несовмещенных модуляционных характеристик трех прожекторов кинескопа. Размахи видеосигналов E'_R, E'_G, E'_B заданы, а постоянные напряжения смещения E_{0R}, E_{0G}, E_{0B} между модуляторами и катодами и постоянные напряжения на первых анодах (относительно катодов) различны для трех прожекторов, и подбором их значений устанавливают необходимое отношение токов лучей, как показано на рис. 3.47 (точки R, G, B). Схемы реализации этого метода даны на рис. 3.48 (сеточная модуляция сигналами E'_R, E'_G, E'_B) и на рис. 3.49 (сеточная модуляция цветоразностными сигналами). В схеме рис. 3.49 отношение размахов цветоразностных сигналов в точках *2*, *3*, *4* должно быть таким же, как отношение сигналов E'_Y на катодах кинескопа. Катодные токи прожекторов в резисторах R1 и R2 создают отрицательную обратную связь (изменения крутизны модуляционной характеристики), что ведет к искажениям цветности. Резистор R4 — для уменьшения этих

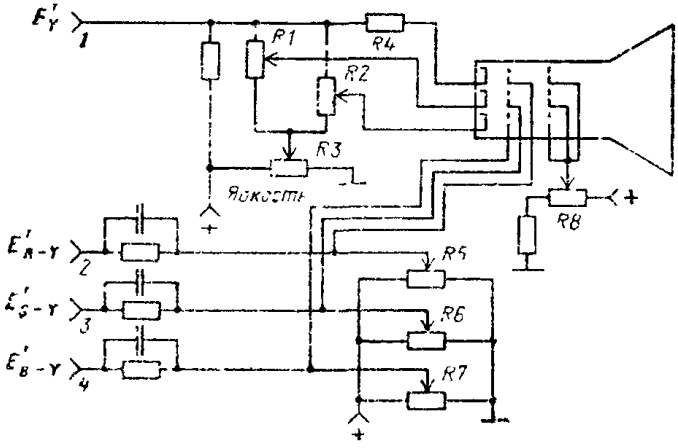


Рис. 3.49. Схема включения трехцветного кинескопа с регулировкой размахов сигналов яркости в цепи катодов и подачей на модуляторы цветоразностных сигналов

искажений. Падения напряжения на резисторах R1, R2, R4 разные. Потенциометры R5, R6, R7 служат для получения необходимых смещений. При регулировке контрастности изменением сигнала яркости E'_Y следует также изменять размахи цветоразностных сигналов в точках *2*, *3*, *4* схемы рис. 3.49, сохраняя их отношение. Если $E'_R = E'_G = E'_B$, то три катода кинескопа соединяются между собой, как показано на рис. 3.50, где диоды служат для восстановления постоянной составляющей в сигналах E'_R, E'_G, E'_B (сигнал E'_Y подается на аноды диодов, цветоразностные сигналы — на их катоды; в результате этого между анодами и катодами диодов приложены сигналы E'_R, E'_G, E'_B).

Метод совмещенных модуляционных характеристик трех прожекторов. При этом методе

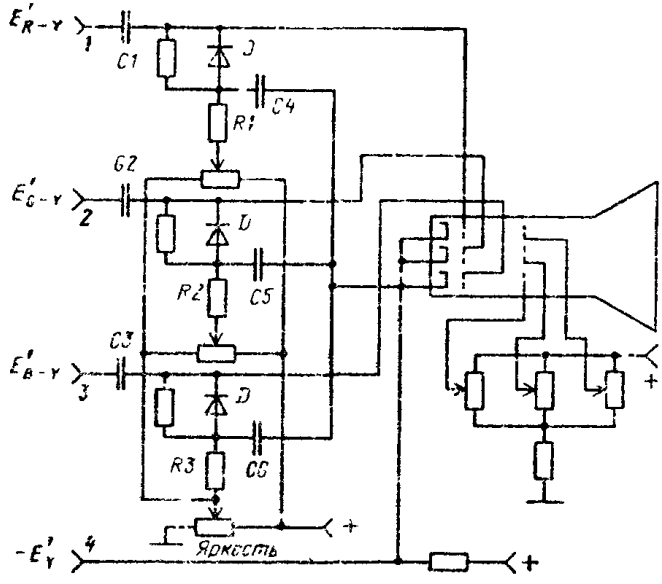


Рис. 3.50. Схема включения трехцветного кинескопа с одинаковыми сигналами яркости на трех катодах

напряжения запирания, а также напряжения смещения на трех прожекторах должны быть одинаковыми. Регулируя напряжения на первых анодах ($u_{a1R} = u_{a1G} = u_{a1B}$) и напряжения смещения ($E_{0R} = E_{0G} = E_{0B}$) и подбирая размахи сигналов E'_R, E'_G, E'_B, получают необходимые токи лучей на белом, как показано на рис. 3.51. Схема включения кинескопа здесь такая же, как на рис. 3.48.

В практике обычно применяют следующую методику установки цветового баланса для всех схем включения кинескопа:

подают на вход в качестве E'_Y ступенчатый сигнал серой шкалы (цветоразностные сигналы не подаются), на входы схемы с сигналами E'_R, E'_G, E'_B вместо них подается одинаковый сигнал серой шкалы;

подбором напряжений на первых анодах u_{a1} и смещений E_0 добиваются одновременного запирания трех лучей кинескопа на черной полосе изображения серой шкалы или получения эталонного белого цвета изображения D_{65} при небольшой яркости (10 . . 20 % от максимальной). Это нижняя точка совмещения трех модуляционных характеристик;

подбором размаха сигнала E'_Y на катодах кинескопа (или сигналов между модуляторами и катодами) добиваются получения эталонного белого цвета D_{65} с максимальной яркостью (т. е. на белой полосе изображения серой шкалы) — это верхняя точка совмещения трех модуляционных характеристик. При этом на всех полосах изображения серой шкалы не должно быть цветных оттенков, отличных от эталонного белого цвета D_{65}, для чего цветовой баланс устанавливают методом последовательных приближений путем повторения регулировки на черном и белом. Если на белой полосе цветность правильная, а на темной — голубой оттенок, то надо увеличить u_{a1R} (т. е. u_{a1} дополнительного цвета), при желтом оттенке — u_{a1B}, при пурпурном — u_{a1G}. При красном оттенке на темной полосе надо уменьшить u_{a1R} (т. е. u_{a1} преобладающего цвета), при зеленом оттенке — u_{a1G}, при синем оттенке — u_{a1B}. Яркость изображения в трехцветном кинескопе должна регулироваться одновременно в трех прожекторах без нарушения условия (3.206), для чего изменяют потенциалы катодов, модуляторов или экранных сеток.

В проекционных кинескопах люминофор работает с большой удельной нагрузкой и поэтому может быть насыщение яркости по току (особенно в люминофорах красного и синего свечений), увеличивающееся в процессе работы кинескопа.

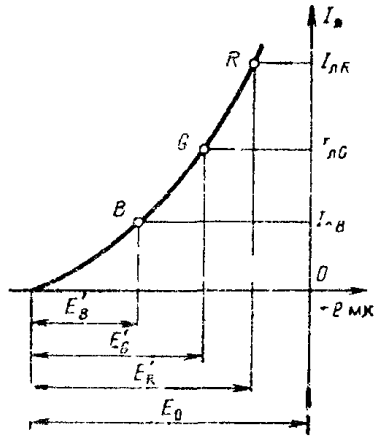


Рис. 3.51. Точки максимальных значений токов лучей трех прожекторов кинескопа при одинаковых напряжениях запирания электронных лучей

3.10. ЯРКОСТЬ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ПРИЕМНИКЕ ЦВЕТНОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Пусть F — световой поток в люменах, излучаемый люминофором кинескопа, яркость свечения которого L в стильбах, $P_л$ — мощность возбуждения люминофора кинескопа в ваттах. Тогда [50, 51]

$$F = \sigma P_л;\ L = F/(\pi S_р);\ P_л = I_л\, u_{а2}, \tag{3.209}$$

где σ — светоотдача люминофора, нанесенного на экран, лм/Вт; $I_л$ — ток электронного луча, приходящего на люминофор, А; $u_{а2}$ — напряжение на втором аноде кинескопа; В; $S_р$ — площадь растра на экране кинескопа, см^2. Если σ'' — светоотдача люминофора на экране, кд/Вт; σ' — светоотдача непрозрачного куска люминофора, лм/Вт, то

$$\sigma = 2\pi\sigma'' = n'\,\sigma'', \tag{3.210}$$

где $n' = 0{,}3 \ldots 0{,}6$ без алюминизации экрана; $n' = 0{,}66 \ldots 0{,}68$ при алюминизации (напомним, что 1 сб $= 10^4$ кд/м^2).

С ростом напряжения $u_{а2}$ светоотдача повышается. Если для трех люминофоров площади растров $S_р$ одинаковы, то из (3.206) получим для любого цвета $Ц$:

$$F_{R\text{и}Ц} : F_{G\text{и}Ц} : F_{B\text{и}Ц} = L_{R\text{и}Ц} : L_{G\text{и}Ц} : L_{B\text{и}Ц} = \alpha_Ц : \beta_Ц : \delta_Ц, \tag{3.211}$$

где $\alpha_Ц$, $\beta_Ц$, $\delta_Ц$ — из (3.205).

Если $Ц_{рс}$ — равносигнальный равностимульный цвет в системе основных цветов приемника, то для его яркостей

$$L_{R\text{и.рс}} : L_{G\text{и.рс}} : L_{B\text{и рс}} = \alpha : \beta : \delta, \tag{3.212}$$

где α, β, δ — из (3.57) или из (3.58).

Если для трех люминофоров $S_р$ и $u_{а2}$ одинаковы, то для цвета $Ц_{рс}$ исходя из (3.209) имеем

$$F_{R\text{и.рс}} : F_{G\text{и.рс}} : F_{B\text{и рс}} = L_{R\text{и.рс}} : L_{G\text{и.рс}} : L_{B\text{и.рс}} =$$
$$= \sigma_R\, I_{лR\text{рс}} : \sigma_G\, I_{лG\text{рс}} : \sigma_B\, I_{лB\text{рс}} = \sigma_R\, \rho_{R\text{рс}} : \sigma_G\, \rho_{G\text{рс}} : \sigma_B\, \rho_{B\text{рс}}, \tag{3.213}$$

где $\rho_{R\text{рс}} = I_{лR\text{рс}}/I_{л\Sigma\text{рс}}$; $\rho_{G\text{рс}} = I_{лG\text{рс}}/I_{л\Sigma\text{рс}}$; $\rho_{B\text{рс}} = I_{лB\text{рс}}/I_{л\Sigma\text{рс}}$;

$$I_{л\Sigma\text{рс}} = I_{лR\text{рс}} + I_{лG\text{рс}} + I_{лB\text{рс}};\ \rho_{R\text{рс}} + \rho_{G\text{рс}} + \rho_{B\text{рс}} = 1. \tag{3.214}$$

Подставив (3.212) в (3.213), получим для цвета $Ц_{рс}$

$$\alpha : \beta : \delta = \sigma_R\, \rho_{R\text{рс}} : \sigma_G\, \rho_{G\text{ рс}} : \sigma_B\, \rho_{B\text{рс}}. \tag{3.215}$$

Отсюда следует для $Ц_{рс}$

$$\sigma_R : \sigma_G : \sigma_B = (\alpha/\rho_{R\text{рс}}) : (\beta/\rho_{G\text{рс}}) : (\delta/\rho_{B\text{рс}}), \tag{3.216}$$

$$\rho_{R\text{рс}} : \rho_{G\text{рс}} : \rho_{B\text{рс}} = (\alpha/\sigma_R) : (\beta/\sigma_G) : (\delta/\sigma_B). \tag{3.217}$$

Суммарный световой поток и суммарная яркость свечения трех люминофоров для любого цвета $Ц$ соответственно:

$$F_{\Sigma Ц} = F_{R\text{и}Ц} + F_{G\text{и}Ц} + F_{B\text{и}Ц};\ L_{\Sigma Ц} = F_{\Sigma Ц}/(\pi S_р), \tag{3.218}$$

где из (3.209) имеем

$$F_{RнЦ}=\sigma_R P_{лRЦ};\ F_{GнЦ}=\sigma_G P_{лGЦ};\ F_{BнЦ}=\sigma_B P_{лBЦ}. \quad (3.219)$$

Из (3.209) получим по аналогии с (3.214)

$$P_{лRЦ}=I_{лRЦ}\,u_{a2}=\rho_{RЦ}\,I_{лΣЦ}\,u_{a2}=\rho_{RЦ}\,P_{лΣЦ};$$
$$P_{лGЦ}=I_{лGЦ}\,u_{a2}=\rho_{GЦ}\,I_{лΣЦ}\,u_{a2}=\rho_{GЦ}\,P_{лΣЦ};$$
$$P_{лBЦ}=I_{лBЦ}\,u_{a2}=\rho_{BЦ}\,I_{лΣЦ}\,u_{a2}=\rho_{BЦ}\,P_{лΣЦ}. \quad (3.220)$$
$$P_{лΣЦ}=I_{лΣЦ}\,u_{a2};\ I_{лΣЦ}=I_{лRЦ}+I_{лGЦ}+I_{лBЦ};$$
$$\rho_{RЦ}=I_{лRЦ}/I_{лΣЦ};\ \rho_{GЦ}=I_{лGЦ}/I_{лΣЦ};\ \rho_{BЦ}=I_{лBЦ}/I_{лΣЦ}. \quad (3.221)$$

Подставим (3.220) в (3.219):

$$F_{Rн Ц}=\sigma_R\rho_{RЦ}P_{лΣЦ};$$
$$F_{Gн Ц}=\sigma_G\rho_{GЦ}P_{лΣЦ};\ F_{Bн Ц}=\sigma_B\rho_{BЦ}P_{лΣЦ}. \quad (3.222)$$

Эффективная светоотдача экрана цветного кинескопа с теневой маской на цвете $Ц$:

$$\sigma_к=F_{ΣЦ}/(I_м\,u_{a2}), \quad (3.223)$$

где $I_м$ — ток трех лучей, приходящих на маску.

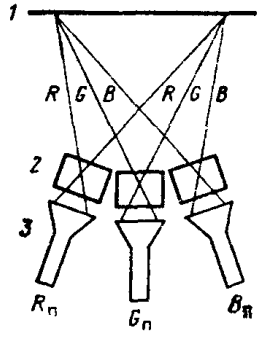


Рис. 3.52. Расположение кинескопов в проекционном приемнике с тремя объективами:
1 — экран, *2* — объективы, *3* — одноцветные кинескопы с основными цветами $R_п$, $G_п$, $B_п$

Вследствие малой прозрачности теневой маски для электронов $I_{лΣ}=(0{,}1\ \ldots\ 0{,}15)\ I_м$ и поэтому $\sigma_к\approx 2\ \ldots\ 5$ лм/Вт, т. е. невелика (в черно-белых кинескопах светоотдача экрана 30 ... 40 лм/Вт).

Пример расчета по формулам для масочного цветного кинескопа, для которого $\sigma_R=5$ лм/Вт; $\sigma_G=28$ лм/Вт; $\sigma_B=2{,}6\ \ldots\ 6{,}6$ лм/Вт. В качестве $Ц_{рс}$ в системе $R_пG_пB_п$ выбираем белый цвет C, для которого из (3.57) $\alpha=0{,}3$; $\beta=0{,}59$; $\delta=0{,}11$. Тогда из (3.217) получим $\rho_{Rрс}:\rho_{Gрс}:\rho_{Bрс}=(0{,}30/5)\ (0{,}59/28):\ (0{,}11/4)=0{,}06:0{,}0211:0{,}0275$.

Сумма $0{,}06+0{,}0211+0{,}0275=0{,}1086$. Отсюда $\rho_{Rрс}=0{,}06/0{,}1086=0{,}552$; $\rho_{Gрс}=0{,}0211/0{,}1086=0{,}194$; $\rho_{Bрс}=0{,}0275/0{,}1086=0{,}252$. Если $I_{лΣ}=0{,}1\ I_м$, при $I_м=1000$ мкА на экран приходит суммарный ток трех лучей, равный на белом $I_{лΣрс}=100$ мкА. При $u_{a2}=25$ кВ получим из (3.209) $P_{лΣрс}=I_{лΣрс}=2{,}5$ Вт. Из (3.222), (3.219) и (3.220) найдем для белого C: $F_{RнЦ}=F_{Rн.рс}=5\cdot0{,}552\cdot2{,}5=6{,}9$ лм; $F_{GнЦ}=F_{Gн.рс}=28\cdot0{,}194\cdot2{,}5=13{,}6$ лм; $F_{BнЦ}=F_{Bнрс}=4\cdot0{,}252\cdot2{,}5=2{,}52$ лм; $F_{ΣЦ}=F_{Σрс}=6{,}9+13{,}6+2{,}52=23{,}02$ лм. При $S_р=48{,}3\cdot37=1790$ см^2 из (3.218) и (3.223) получим для белого C: $L_{ΣЦ}=L_{Σрс}=23{,}02/(\pi\cdot1790)=4.06\cdot10^{-3}$ сб$=40{,}6$ кд/м^2; $\sigma_к=23{,}02/(10^{-3}\cdot25000)=0{,}92$ лм/Вт.

Для сравнения укажем, что в хороших кинотеатрах максимальная яркость экрана на белом составляет 5 ... 10 мсб. (50 ... 100 кд/м^2).

Для получения экрана средних размеров (диагональ 1 ... 1,5 м) применяется система из трех проекционных одноцветных кинескопов (с экранами красного, зеленого и синего свечений) и трех проекционных объективов (многолинзовых или зеркально-линзовых типа оптики Шмидта), как показано на рис. 3.52. Если яркость свечения кине-

скопа $L_т$, то на проекционном экране он создает яркость изображения

$$L_и = \varphi v L_т, \tag{3.224}$$

где φ — коэффициент, определяемый проекционной оптикой; $v = \tau\rho$; τ, ρ — коэффициенты пропускания и отражения светового луча в оптическом тракте для данного спектрального состава светового потока.

Коэффициент

$$\varphi = O''^2 \tau_{об} \rho_э r K_э / [4 (1 + v)^2], \tag{3.225}$$

где O'' и v — относительное отверстие и увеличение проекционной системы соответственно (v — отношение размера изображения на проекционном экране к размеру изображения на экране кинескопа), $\tau_{об}$ — коэффициент пропускания проекционной системы, $\rho_э$ — коэффициент отражения от вспомогательных зеркал (если они применяются), r — коэффициент усиления яркости проекционным экраном (по сравнению с идеальным диффузным экраном; для излучения в пределах телесного угла $\pi/2$ имеем $r = 2$); $K_э$ — коэффициент отражения $\rho_э$ или пропускания $\tau_э$ проекционного экрана. Обычно значения φ одинаковы для трех световых лучей $R_п$, $G_п$, $B_п$. В практике имеют место следующие значения этих величин: $O'' = 1{,}25 \ldots 1{,}67$; $\tau_{об} = 0{,}2 \ldots 0{,}5$; $\rho_э = 0{,}8 \ldots 0{,}9$; $r = 1 \ldots 10$; $\tau_э = 0{,}5 \ldots 0{,}7$; $\rho_э = 0{,}6 \ldots 0{,}7$.

Глава 4

СИГНАЛЫ ЦВЕТНОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

4.1. СИГНАЛ ЯРКОСТИ И ЦВЕТОРАЗНОСТНЫЕ СИГНАЛЫ

В § 3.2 было показано, что по мере уменьшения угловых размеров предметов их цвета изменяются вначале по оси Q, приближаясь к оси I (см. рис. 3.3), затем вдоль оси I, приближаясь к точке W (белый цвет). Показано также (см. рис. 3.6), что при числе строк развертки 625 и частоте кадров 25 Гц для передачи информации о яркости применяется полоса частот видеосигнала 6 МГц, а для передачи информации о цветности предметов средних размеров (10 ... 20′), когда зрение двухцветно (по оси I), достаточна полоса 1,5 ... 1,8 МГц.

Для передачи информации о цветности предметов крупных размеров (более 20′, когда зрение трехцветно), достаточна полоса частот 0,6 ... ... 0,8 МГц. Таким образом, информация о яркости предмета должна передаваться широкополосными сигналами яркости E_Y' или $E_Y^{1/\gamma}$, а информация о его цветности должна передаваться отдельно, в виде сиг-

нала цветности. При этом сигнал цветности не должен содержать информацию о яркости предмета, и поэтому он содержит информацию о цветоразностях основных цветов. Эта информация передается в виде цветоразностных сигналов (3.171):

$$E'_{R-Y}=E'_R-E'_Y;\ E'_{G-Y}=E'_G-E'_Y;\ E'_{B-Y}=E'_B-E'_Y. \qquad (4.1)$$

которые соответствуют колориметрическим цветоразностям из (3.183), (3.184), (3.188). Сигнал яркости E'_Y определяется (3.170). Вместо передачи трех цветоразностных сигналов из (4.1) достаточно передавать в приемник два их них, а третий, например E'_{G-Y}, формировать в приемнике в соответствии с (3.187). Обычно передают сигналы «красный» E'_{R-Y} и «синий» E'_{B-Y}, как более помехоустойчивые. Их можно передавать как в отдельных каналах связи, так и в канале сигнала яркости E'_Y, но путем модуляции одного или двух поднесущих колебаний, размещая последние в спектре сигнала яркости E'_Y или в другой (более высокочастотной) части спектра. Возможна также не одновременная, а поочередная передача двух цветоразностных сигналов (например, через строку) или передача в интервале строчных гасящих импульсов цветоразностных сигналов (поочередно) сжатых во времени в 4—5 раз.

Известны три стандартные системы цветного телевидения — СЕКАМ, NTSC, PAL. В системе СЕКАМ в каждой строке передаются сигнал яркости E'_Y и один цветоразностный сигнал (например в строке n сигнал E'_{R-Y}, в строке $n+1$ сигнал E'_{B-Y}, в строке $n+2$ сигнал E'_{R-Y} и т. д.) методом частотной модуляции поднесущего колебания (двухсигнальная система). В системах NTSC и PAL в каждой строке передаются сигналы яркости E'_Y и два цветоразностных сигнала методом квадратурной модуляции поднесущего колебания (трехсигнальная система). При квадратурной модуляции поднесущее колебание с частотой f_0 состоит из двух колебаний с частотой f_0, сдвиг фаз между которыми равен 90°, оба они модулируются по амплитуде — одно сигналом E'_{R-Y}, другое — сигналом E'_{B-Y}. Суммарное поднесущее колебание имеет амплитудно-фазовую модуляцию, причем в приемнике применяются два синхронных детектора для выделения этих сигналов.

Сигнал на поднесущей называется *сигналом цветности* $u_ц$. Таким образом, в приемник передается полный цветовой сигнал

$$e_п=E'_Y+u_ц+E_{си}+u_{ц.с}, \qquad (4.2)$$

где $E_{си}$ — синхроимпульсы (стандартные, как в системе черно-белого телевидения); $u_{ц.с}$ — сигнал цветовой синхронизации на поднесущей, необходимый для правильного детектирования сигнала цветности в приемнике.

На рис. 4.1 показан спектральный состав сигнала $e_п$. Сигнал $u_ц$ имеет две одинаковые боковые полосы частот, как в системах СЕКАМ и PAL.

Сигнал яркости. При линейном тракте яркость изображения создается в приемнике цветного телевидения в соответствии с (3.79), (3.80).

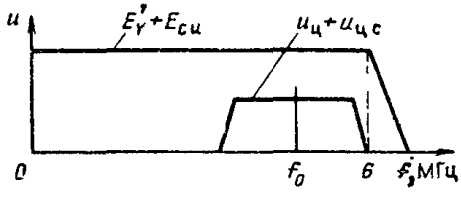


Рис. 4.1. Расположение спектра сигнала цветности на поднесущей частоте в спектре сигнала яркости

(3.78), линейный сигнал яркости E_Y определяется из (3.168):

$$E_Y = \alpha E_R + \beta E_G + \delta E_B, \qquad (4.3)$$

где E_R, E_G, E_B — линейные сигналы основных цветов; α, β, δ — относительные яркости основных цветов приемника, необходимые для получения равностимульного цвета их смеси $Ц_р$. В качестве треугольника основных цветов приемника принято использовать треугольник NTSC (см. табл. 3.4), в качестве $Ц_р$ — белый цвет C. В этом случае

$$\alpha = 0{,}29891;\ \beta = 0{,}58662;\ \delta = 0{,}11448;\ \alpha + \beta + \delta = 1. \qquad (4.4)$$

Сигнал E_Y несет правильную информацию о полной яркости передаваемого оригинала, если $Y_{ц\,и} = akY_0$ в соответствии с (3.25), где коэффициенты a и k определяются из (3.23), (3.9) и (3.20); Y_0 — яркость оригинала в единицах его координаты Y. Так как яркость изображения на экране кинескопа $L = S_1 E_c^{\gamma_к}$ (3.195), то для правильного воспроизведения яркости в приемнике черно-белого телевидения необходимо информацию о яркости цвета $Ц$ передавать в виде сигнала

$$E_{ч\text{-}б} = E_Y^{1/\gamma_к} = (\alpha E_R + \beta E_G + \delta E_B)^{1/\gamma_к} = (1/a)^{1/\gamma_к} Y^{1/\gamma_к}, \qquad (4.5)$$

так как из (3.167) имеем $E_Y = (1/a)\,Y$.

В цветном телевидении для неискаженной цветопередачи необходимо выполнить условие (3.22), т. е. (3.31), требующее передачи нелинейных сигналов [см. (3.26) и (3.169)]:

$$E'_R = E_R^{1/\gamma_{гк\,R}};\ E'_G = E_G^{1/\gamma_{гк\,G}};\ E'_B = E_B^{1/\gamma_{гк\,B}}, \qquad (4.6)$$

где E_R, E_G, E_B; E'_R, E'_G, E'_B — сигналы на входе и выходе гамма-корректора соответственно; сигналы E_R, E_G, E_B определены из (3.19), если $\gamma_{ц.т} \neq 1$, а условия гамма-коррекции — из (3.14), (3.121), (3.200). По аналогии с (4.3) из сигналов (4.6) образуют нелинейный сигнал яркости (см. (3.170))

$$E'_Y = \alpha E'_R + \beta E'_G + \delta E'_B. \qquad (4.7)$$

Из (3.174) и (3.170) получим при $\gamma_{гк\,R} = \gamma_{гк\,G} = \gamma_{гк\,B} = \gamma_{гк}$:

$$Y' = \alpha R_{п.и}^{1/\gamma_{гк}} + \beta G_{п.и}^{1/\gamma_{гк}} + \delta B_{п.и}^{1/\gamma_{гк}} = E'_Y/a' =$$

$$= a^{1/\gamma_{гк}} E'_Y - a^{1/\gamma_{гк}} (\alpha E'_R + \beta E'_G + \delta E'_B). \qquad (4.8)$$

Из (3.175) и (3.167) имеем

$$Y^{1/\gamma_{гк}} = (\alpha R_{п.и} + \beta G_{п.и} + \delta B_{п.и})^{1/\gamma_{гк}} =$$

$$= (aE_Y)^{1/\gamma_{гк}} = a^{1/\gamma_{гк}} E_Y^{1/\gamma_{гк}}. \qquad (4.9)$$

Из сравнения (4.7) с (4.5) и (4.8) с (4.9) следует

$$E'_Y \neq E_Y^{1/\gamma_{гк}};\ E'_Y < E_Y^{1/\gamma_{гк}};\ Y' \neq Y^{1/\gamma_{гк}};\ Y' < Y^{1/\gamma_{гк}}. \qquad (4.10)$$

Из (4.9) и (4.8) следует при $\gamma_к = \gamma_{гк}$:

$$(Y^{1/\gamma_{гк}})^{\gamma_к} = Y = aE_Y;\ (Y')^{\gamma_к} = a(E'_Y)^{\gamma_к};$$

$$(Y')^{\gamma_к} \neq Y;\ (Y')^{\gamma_к} < Y. \qquad (4.11)$$

Для равносигнального цвета подставляем $E_{рс}$ из (3.133) вместо E_R, E_G, E_B в (3.168) и $E'_{рс} = E_{рс}^{1/\gamma_{гк}}$ вместо E'_R, E'_G, E'_B в (3.170) и с учетом (3.55) имеем

$$E_{Yрс} = E_{рс};\ E_{Yрс}^{1/\gamma_{гк}} = E_{рс}^{1/\gamma_{гк}} = E'_{рс};$$

$$E'_{Y\,рс} = E_{Y\,рс}^{1/\gamma_{гк}} = E'_{рс} = E'_{Rрс} = E'_{Gрс} = E'_{Bрс}. \qquad (4.12)$$

В приемнике цветного телевидения яркость изображения определяется сигналами основных цветов E'_R, E'_G, E'_B, модулирующими электронные лучи трех прожекторов кинескопа и соответствует (3.29), (3.24), и поэтому отличие сигналов яркости E'_Y от $E_Y^{1/\gamma_{гк}}$ не создает здесь искажений яркости.

В приемнике черно-белого изображения сигнал яркости E'_Y создает яркость $L_ч = S_1 (E'_Y)^{\gamma_к} = (S_1/a)(Y')^{\gamma_к}$ при $\gamma_к = \gamma_{гк}$ в соответствии с (3.195) и (4.8), что означает появление искажений яркости на насыщенных цветах передаваемой сцены (их яркость в изображении получается меньше необходимой); сигнал $E^{1/\gamma_{гк}}$ создает здесь яркость $L_и = S_1 (E_Y^{1/\gamma_{гк}})^{\gamma_к} = S_1 E_Y = (S_1/a) Y$ в соответствии с (3.167) при $\gamma_к = \gamma_{гк}$, и искажения яркости при этом нет.

Сигнал яркости E'_Y имеет еще один важный недостаток: так как он образуется сложением трех сигналов E'_R, E'_G, E'_B в соответствии с (4.7), то четкость и резкость изображения (в приемниках цветного и черно-белого телевидения) весьма критично зависят от точности совмещения трех этих сигналов друг с другом, т. е. если в данный момент сигнал E'_R создается элементом n_i передаваемой сцены, то сигналы E'_G и E'_B должны в этот момент создаваться также этим, а не другими элементами. Это условие точного совмещения растров должно соблюдаться все время для всех элементов как в передающей камере, так и в цветном кинескопе, иначе на цветном изображении появятся цветные окантовки на границах между цветами, что приведет к потере четкости и резкости изображения. Оба недостатка сигнала E'_Y можно избежать, если

вместо него передавать сигнал $E'^{1/\gamma_{\text{тк}}}$, создавая его отдельной передающей трубкой, как в черно-белом телевидении. Но в этом случае в приемнике цветного телевидения сигналы E'_R, E'_G, E'_B оказываются искаженными [47, с. 331—352].

В качестве равносигнального (равностимульного в системе $R_{\text{п}}G_{\text{п}}B_{\text{п}}$) цвета $Ц_{\text{рс}}$ в изображении на экране цветного кинескопа выбирается белый цвет D_{65}, для которого $R_{\text{п}} = G_{\text{п}} = B_{\text{п}}$, и поэтому справедливо условие (3.179), т. е.

$$R_{\text{п.и.рс}} = G_{\text{п.и.рс}} = B_{\text{п и.рс}};\ (E'_{R-Y})_{\text{рс}} = (E'_{G-Y})_{\text{рс}} = (E'_{B-Y})_{\text{рс}} = 0, \tag{4.13}$$

т. е. цветоразностные сигналы при передаче этого цвета равны нулю. При приеме программы черно-белого телевидения на цветной телевизор три люминофора его кинескопа возбуждаются под действием равных сигналов $E_R = E_G = E_B = E_{\text{ч б}}$, и поэтому цвет изображения в нем будет равносигнальным. Сигнал яркости E'_Y создается на выходе матричной схемы, показанной на рис. 4.2.

Цветоразностные сигналы. В настоящее время во всех вещательных системах цветного телевидения применяются нелинейные цветоразностные сигналы, определяемые (4.1).

Подставив (4.7) в (4.1), получим

$$\begin{aligned}
E_{R-Y} &= E'_R - E'_Y = (1-\alpha)\,E'_R - \beta E'_G - \delta E'_B;\\
E'_{G\ Y} &= E'_G - E'_Y = -\alpha E'_R + (1-\beta)\,E'_G - \delta E'_B;\\
E'_{B\ Y} &= E'_B - E'_Y = -\alpha E'_R - \beta E'_G + (1-\delta)\,E'_B.
\end{aligned} \tag{4.14}$$

Установим связь между цветоразностными сигналами. Имеем из (4.7): $0 = \alpha E'_R + \beta E'_G + \delta E'_B - E'_Y$. Но $E'_Y = (\alpha + \beta + \delta)\,E'_Y$, так как $\alpha + \beta + \delta = 1$. Тогда $0 = \alpha E'_R + \beta E'_G + \delta E'_B - (\alpha + \beta + \delta)\,E'_Y = \alpha\,(E'_R - E'_Y) + \beta\,(E'_G - E'_Y) + \delta\,(E'_B - E'_Y)$. Отсюда

$$\begin{aligned}
E'_{R-Y} &= -(\beta/\alpha)\,E'_{G\ Y} - (\delta/\alpha)\,E'_{B-Y};\\
E'_{G\ Y} &= -(\alpha/\beta)\,E_{R-Y} - (\delta/\beta)\,E'_{B\ Y};\\
E'_{B-Y} &= -(\alpha/\delta)\,E'_{R\ Y} - (\beta/\delta)\,E'_{G\ Y}.
\end{aligned} \tag{4.15}$$

Подставив α, β, δ из (4.4) для белого C и треугольника NTSC (см. табл. 3.4), получим

$$\begin{aligned}
E_{R-Y} &= 0{,}70110E'_R - 0{,}58662E'_G - 0{,}11448E'_B;\\
E'_{G-Y} &= -0{,}29890E'_R + 0{,}41338E'_G - 0{,}11448E'_B;\\
E'_{B\ Y} &= -0{,}29890E'_R - 0{,}58662E'_G + 0{,}88552E'_B,
\end{aligned} \tag{4.16}$$

$$\begin{aligned}
E'_{R-Y} &= 1{,}96260E'_{G-Y} - 0{,}38300E'_{B-Y};\\
E'_{G-Y} &= -0{,}50953E'_{R\ Y} - 0{,}19515E'_{B-Y};\\
E'_{B-Y} &= -2{,}61094E'_{R-Y} - 5{,}12421E'_{G-Y}.
\end{aligned} \tag{4.17}$$

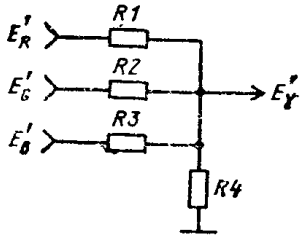


Рис. 4.2. Матричная схема для получения сигнала E'_Y

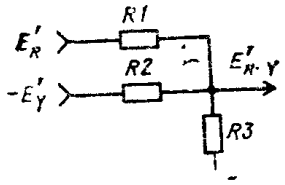


Рис. 4.3. Матричная схема для получения цветоразностного сигнала

Цветоразностный сигнал E'_{R-Y} (4.1) формируется сложением сигнала основного цвета E'_R с сигналом $-E'_Y$ с помощью матричной схемы рис. 4.3. Сигнал $(-E'_Y)$ получают путем поворота фазы сигнала яркости на 180°. Аналогично формируется сигнал E'_{B-Y}. Можно также формировать цветоразностные сигналы из трех сигналов основных цветов по (4.16), применяя такие же схемы, как на рис. 4.2. Сигнал E'_{G-Y} формируют в приемнике в матричной схеме по (4.17), подавая на ее входы сигналы E'_{R-Y} и E'_{B-Y} (знак минус у этих сигналов получается путем поворота фазы сигналов E'_{R-Y} и E'_{B-Y} на 180).

На белом D_{65} на входе матричных схем должно быть

$$E'_R = E'_G = E'_B = E_0, \tag{4.18}$$

где E_0 — максимальный размах сигнала от уровня черного до уровня белого. Можно принять условно $E_0 = 1$. Тогда имеем на белом D_{65}

$$E'_{YD} = (\alpha + \beta + \delta) E_0 = E_0 = 1. \tag{4.19}$$

Максимальные размахи цветоразностных сигналов относительно E_0 (см. табл. 4.7):

$$E'_{R-Y} = 1{,}40;\ E'_{G-Y} = 0{,}82;\ E'_{B-Y} = 1{,}78, \tag{4.20}$$

т. е. сигнал E'_{G-Y} имеет наименьший размах и поэтому не передается

Сигналы основных цветов E'_R, E'_G, E'_B являются широкополосными (50 Гц ... 6 МГц), цветоразностные сигналы — узкополосными (50 Гц ... 1,5 МГц). В приемнике сигналы основных цветов E'_R, E'_G, E'_B получают, добавляя к цветоразностным сигналам сигнал яркости в соответствии с уравнениями

$$\begin{aligned} E'_R &= E'_{R-Y} + E'_Y = E'_R - E'_Y + E'_Y; \\ E'_G &= E'_{G-Y} + E'_Y = E'_G - E'_Y + E'_Y; \\ E'_B &= E'_{B-Y} + E'_Y = E'_B - E'_Y + E'_Y. \end{aligned} \tag{4.21}$$

Сигналы E'_R, E'_G, E'_B формируются с помощью матричных схем, как показано на рис. 4.4, *а* или получать эти сигналы в кинескопе,

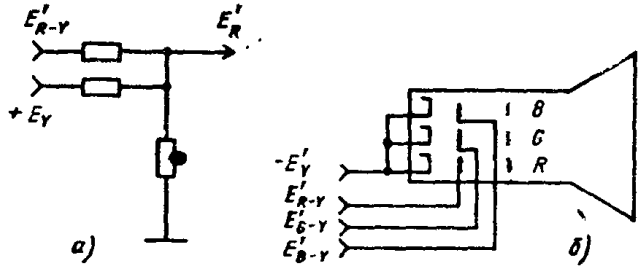


Рис. 4.4. Схемы формирования сигналов основных цветов приемника сложением цветоразностных сигналов и сигнала яркости:

а — матричная; *б* — схема матрицирования в прожекторах кинескопа

как показано на рис. 4.4, *б*. Здесь сигнал E'_Y подается на катоды, три цветоразностных сигнала — на модуляторы; на электронные лучи действуют сигналы основных цветов, приложенные между модуляторами и катодами по (4.21). Так как цветоразностные сигналы узкополосные, то получить их с большим размахом легче, чем широкополосные.

На рис. 4.5 показаны спектры частот складываемых сигналов. Как видно из рис. 4.5, *б*, в полосе частот ниже $f_{в.ц}$ спектральные составляющие сигнала яркости E'_Y в цветоразностных сигналах компенсируются в приемнике спектральными составляющими сигнала E'_Y в полосе частот ниже $f_{в.ц}$, в результате чего сигнал, например E'_R, состоит из составляющих с частотами до $f_{в.ц}$, а в полосе частот от $f_{в.ц}$ до $f_в$ — из высокочастотных составляющих сигнала яркости E'_Y, которые необходимы для воспроизведения в черно-белом виде мелких деталей и резких перепадов яркости. Таким образом, в приемнике создается цветное изображение с четкостью, определяемой сигналами основных цветов с полосой частот до $f_{в.ц}$, как бы наложенное на черно-белое изображение с высокой четкостью (с полосой частот до $f_в$).

Сигналы E'_{R-Y} и E'_{B-Y} должны иметь одинаковые полосы частот, их называют также *равнополосными*. При уменьшении их спектра до 0,5 МГц качество цветного изображения остается достаточно высоким. Если сделать сигналы E'_{R-Y} и E'_{B-Y} — разнополосными, т. е. значительно уменьшить ширину спектра одного из них, например до 0,6 МГц, то качество цветного изображения заметно ухудшится (появятся цветные окантовки, вызванные переходными процессами). Однако опыт показал, что можно получить высокое качество цветного изображения при использовании разнополосных цветоразностных сигналов, если их формировать по осям I и Q (см. рис. 3.5) по следующим формулам, обозначив один из них E'_I широкополосный, а другой E'_Q узкополосный соответственно

$$E'_I = M_1 E'_{R-Y} \cos 33° - M_2 E'_{B-Y} \cos 57°;$$

$$E'_Q = M_1 E'_{R-Y} \cos 57° + M_2 E'_{B-Y} \cos 33°, \qquad (4.22)$$

где $M_1 = 0{,}87695$; $M_2 = 0{,}49283$; $\cos 33° = 0{,}83867$; $\cos 57° = 0{,}54464$.

Отсюда

$$E'_I = 0{,}73547E'_{R-Y} - 0{,}26841E'_{B-Y};$$
$$E'_Q = 0\ 47762E'_{R-Y} - 0{,}41332E'_{B-Y}. \qquad (4.23)$$

Подставив (4.16) в (4.23), получим

$$E'_I = 0{,}59587E'_R - 0{,}27398E'_G - 0{,}32190E'_B;$$
$$E'_Q = 0{,}21132E'_R - 0{,}52264E'_G + 0{,}31135E'_B. \qquad (4.24)$$

Решая (4.23) относительно E'_{R-Y} и E'_{B-Y}, имеем

$$E'_{R-Y} = 0{,}95635E'_I + 0{,}62106E'_Q;$$
$$E'_{B-Y} = -1{,}10513E'_I + 1{,}70174E'_Q. \qquad (4.25)$$

Из (4.17) и (4.25) получим

$$E'_{G-Y} = -0{,}27162E'_I - 0{,}64854E'_Q. \qquad (4.26)$$

Если к сигналам (4.25) и (4.26) добавить сигнал E'_Y, то получим сигналы:

$$E'_R = 0{,}95635E'_I + 0{,}62106E'_Q + E'_Y;$$
$$E'_G = -0{,}27162E'_I - 0{,}64854E'_Q + E'_Y;$$
$$E'_B = -1{,}10513E'_I + 1{,}70174E'_Q + E'_Y. \qquad (4.27)$$

Все преобразования, определяемые (4.23) — (4.27), выполняются в матричных схемах, аналогичных показанным на рис. 4.2 или рис. 4.3. Полосу частот для сигналов E'_I, E'_Q выбирают соответственно $f_{вI}$ —

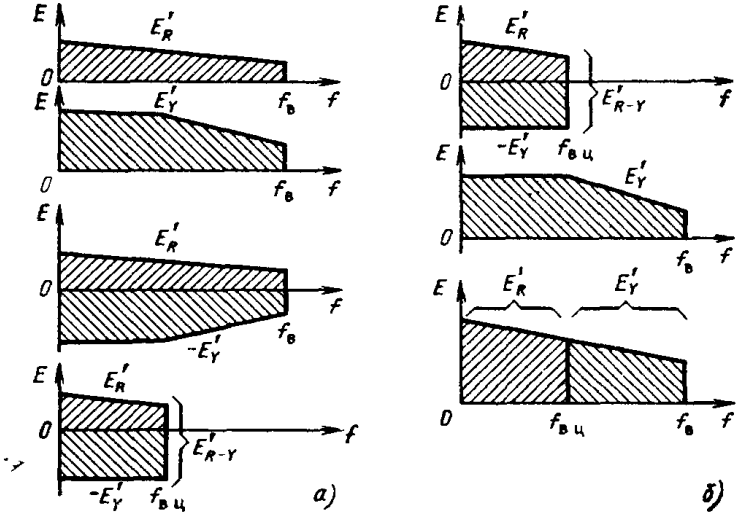


Рис. 4.5. Спектры сигналов:

а цветоразностного в кодере передатчика; *б* — основного цвета в приемнике

$= 1{,}5 \ldots 2$ МГц, $f_{BQ} = 0{,}5 \ldots 0{,}8$ МГц (при числе строк развертки 625).

Сигналы E'_I и E'_Q применены в системе цветного телевидения NTSC, в которой они передаются на одной поднесущей путем ее квадратурной модуляции, причем сигнал E'_I на поднесущей передается с подавлением части верхней боковой полосы, а сигнал E'_Q — с одинаковыми боковыми полосами. В системе NTSC наилучшие результаты были получены при сдвиге фазы поднесущей на угол 33° от оси, соответствующей сигналу E'_{B-Y} на поднесущей.

Линии постоянных значений отношений сигналов на диаграмме цветностей были построены (см. рис. 3.32 и 3.33) для постоянных отношений $R_п/Y$; $G_п/Y$, $B_п/Y$. Величины $R_п$, $G_п$, $B_п$, Y относятся к изображению в приемнике. Пользуясь (3.20) и (3.167), получим

$$E_R/E_Y = R_п/Y;\ E_G/E_Y = G_п/Y;\ E_B/E_Y = B_п/Y. \qquad (4.28)$$

Таким образом, рис. 3.32 и 3.33 представляют собой также линии постоянных отношений сигналов E_R/E_Y; E_G/E_Y; E_B/E_Y. Линейными цветоразностными сигналами назовем следующие сигналы:

$$E_{R-Y} = E_R - E_Y;\ E_{G-Y} = E_G - E_Y;\ E_{B-Y} = E_B - E_Y. \qquad (4.29)$$

По аналогии с (4.13) напишем

$$(E_{R-Y})_{рс} = (E_{G-Y})_{рс} = (E_{B-Y})_{рс} = 0. \qquad (4.30)$$

Из (3.20) и (3.167) имеем

$$E_{R-Y} = (1/a)(R_п - Y);\ E_{G-Y} = (1/a)(G_п - Y);$$
$$E_{B-Y} = (1/a)(B_п - Y). \qquad (4.31)$$

Из (4.31) и (3.167) получим нормализованные линейные цветоразностные сигналы:

$$E_{R-Y}/E_Y = (R_п - Y)/Y;\ E_{G-Y}/E_Y = (G_п - Y)/Y;$$
$$E_{B-Y}/E_Y = (B_п - Y)/Y. \qquad (4.32)$$

Из (4.32) следует, что линии постоянных отношений $K = (R_п - Y)/Y$; $N = (B_п - Y)/Y$; $F = (G_п - Y)/Y$ (см. рис. 3.30, 3.31) представляют собой, как это следует из (4.32), линии постоянных отношений сигналов E_{R-Y}/E_Y; E_{B-Y}/E_Y; E_{G-Y}/E_Y.

Из (4.5) и (3.169) получим при $\gamma_к = \gamma_{гк} = \gamma$

$$E'_R/E_Y^{1/\gamma} = (R_п/Y)^{1/\gamma},\ E'_G/E_Y^{1/\gamma} = (G_п/Y)^{1/\gamma};$$
$$E'_B/E_Y^{1/\gamma} = (B_п/Y)^{1/\gamma}. \qquad (4.33)$$

Из (4.33) следует, что линии постоянных отношений

$(R_п/Y)^{1/\gamma}$; $(G_п/Y)^{1/\gamma}$; $(B_п/Y)^{1/\gamma}$

(см. рис. 3.34 и 3.35) представляют собой линии постоянных отношений нелинейных сигналов $E'_R/E'^{1/\gamma}_Y$; $E'_G/E'^{1/\gamma}_Y$; $E'_B/E'^{1/\gamma}_Y$. Из (3.167) имеем $Y^{1/\gamma_{гк}} = (aL'_Y)^{1/\gamma_{гк}}$; из (3.173) имеем $a'Y^{1/\gamma_{гк}} = (Y/a)^{1/\gamma_{гк}}$. Следовательно, $(a'\,Y^{1/\gamma_{гк}}) = E^{1/\gamma_{гк}}$. Подставив это выражение в (3.180) и (3.181), получим

$$K' = E'_{R-Y}/E'^{1/\gamma_{гк}}_Y; \quad N' = E'_{B-Y}/E'^{1/\gamma_{гк}}_Y. \tag{4.34}$$

Линии постоянных значений K' и N' (см. рис. 3.36) также представляют собой отношения сигналов из (4.34). Из (3.20) имеем $E'_R = [(1/a)R_п]^{1/\gamma_{гк}}$. Подставив эти выражения в (4.1), получим $E'_{R-Y} = E'_R - E'_Y = (1/a)^{1/\gamma_{гк}}(R'^{1/\gamma_{гк}}_п - Y') = (1/a)^{1/\gamma_{гк}}(R'_п - Y')$. Подставив из этих выражений $(R'_п - Y')$ и Y' в (3.183), получим для K'' из (3.183) и аналогично для N'' из (3.184)

$$K'' = (R'_п - Y')/Y' = E'_{R-Y}/E'_Y;$$
$$N'' = (B'_п - Y')/Y' = E'_{B-Y}/E'_Y. \tag{4.35}$$

Линии постоянных значений K'' и N'' (см. рис. 3.37 и 3.38) представляют собой также отношения сигналов из (4.35).

Определим диапазон значений цветоразностей и цветоразностных сигналов. Пользуясь значениями $X_{макс}$, $Z_{макс}$, $Y_{макс}$ из графиков рис. 2.72 ... 2.74 для цветных поверхностей, освещаемых источником C, можно для каждой точки диаграммы цветностей найти значения цветоразностей $D_X = X_{макс} - Y_{макс}$ и $D_Z = Z_{макс} - Y_{макс}$. Линии постоянных значений D_X и D_Z даны на рис. 4.6 и 4.7. Из этих рисунков видно, что пределы изменения $D_X = 0{,}4 \ldots -0{,}4$, $D_Z = 1 \ldots -0{,}8$

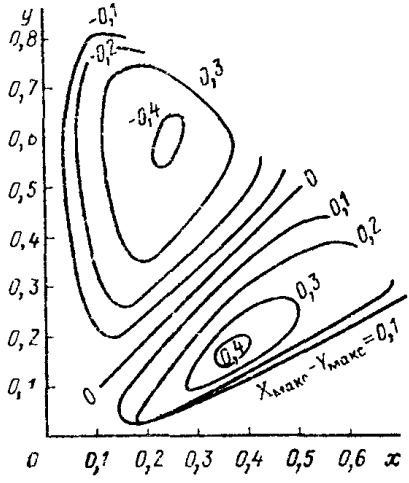


Рис. 4.6. Линии постоянных значений цветоразностей $D_X = X_{макс} - Y_{макс}$

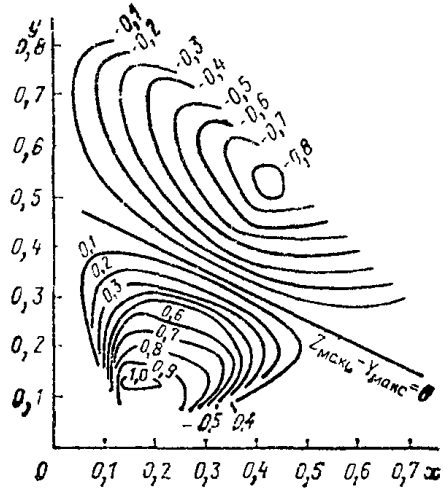


Рис. 4.7. Линии постоянных значений цветоразностей $D_Z = Z_{макс} - Y_{макс}$

Измерения размахов цветоразностных сигналов E'_{R-Y}, E'_{B-Y}, E'_I и E'_Q, проведенные на большом числе цветных диапозитивов различных сюжетов, дали такие результаты: средние размахи сигналов E'_I, E'_Q, E'_{R-Y} и E'_{B-Y} не превышали 34, 11, 25, 26 % размаха полного видеосигнала от вершины синхроимпульсов до уровня белого соответственно (размах синхроимпульсов 30 %). Размахи сигналов E'_{R-Y}, E'_{B-Y}, E'_I не превышали 30 ... 40 %, а размах сигнала E'_Q не превышал 20 %.

По аналогии с рис. 2.39 найдем на диаграмме цветностей x, y точки, представляющие цвета (Q) и $(-I)$. Координаты этих цветов обозначим Q и I. Цвета (Q) и (I), как и цвета $(R_п - Y)$, $(B_п - Y)$, $(G_п - Y)$ не имеют яркости (так как это цветоразности) и представляются точками на алихне, т. е. на оси x. Обозначим

$$I/Y = S. \tag{4.36}$$

Из аналогии с рис. 3.29 следует, что точка (Q) лежит на пересечении оси x с прямой, для которой $S = 0$; эта прямая проходит через точку $Ц_р$. Пользуясь (4.23) и (4.24), напишем для координат цветов (I) и (Q):

$$I = 0{,}74\,(R_п - Y) - 0{,}27\,(B_п - Y) = 0{,}60R_п - 0{,}27G_п = -0{,}32B_п;$$

$$Q = 0{,}48\,(R_п - Y) + 0{,}41\,(B_п - Y) = 0{,}21R_п - 0{,}52G_п - 0{,}31B_п. \tag{4.37}$$

По аналогии с (3.20) $I = aE_I$; $Q = aE_Q$ при $a_1 = a_2 = a_3 = a$, и тогда

$$S = I/Y = E_I/E_Y = [0{,}74\,(R_п - Y) - 0{,}27\,(B_п - Y)]/Y. \tag{4.38}$$

Подставив $S = 0$ в (4.38), имеем $0{,}74\,(R_п - Y) - 0{,}27\,(B_п - Y) = 0$. Разделив все члены этого уравнения на Y, имеем

$$\frac{R_п - Y}{Y} - \frac{0{,}27\,(B_п - Y)}{0{,}74Y} = 0; \quad \frac{R_п - Y}{Y} - 0{,}365\,\frac{B_п - Y}{Y}. \tag{4.39}$$

Найдем на диаграмме цветностей x, y на линии $R_п G_п$ точку $Ц_1$, удовлетворяющую условию (4.39). На линии $R_п G_п$ $N = -1$, как это следует из рис. 3.29. Подставив $N = (B_п - Y)/Y = -1$ в (4.39), найдем, что точка $Ц_1$ на линии $R_п G_п$, удовлетворяющая (4.39), имеет значение $(R_п - Y)/Y = -0{,}365$, т. е. $K = -0{,}365 \approx -0{,}37$, как показано на рис. 4.8 для треугольника NTSC. Здесь K соответствует (3.139). Находим точку $Ц_1$ на рис. 4.8 и соединяем ее прямой с точкой $Ц_р$; эта прямая пересекает ось x в точке (Q), имеющей координаты $x = 0{,}245$ и $y = 0$. Точка (Q) представляет цвет (Q). Прямая, соединяющая точки $Ц_1$, $Ц_р$ и (Q), называется осью Q или осью S, так как на ней $I = 0$ исходя из (4.36). Вместо графического определения оси Q можно найти координаты x, y точки $Ц_1$ и уравнение оси Q аналитически. Для этого

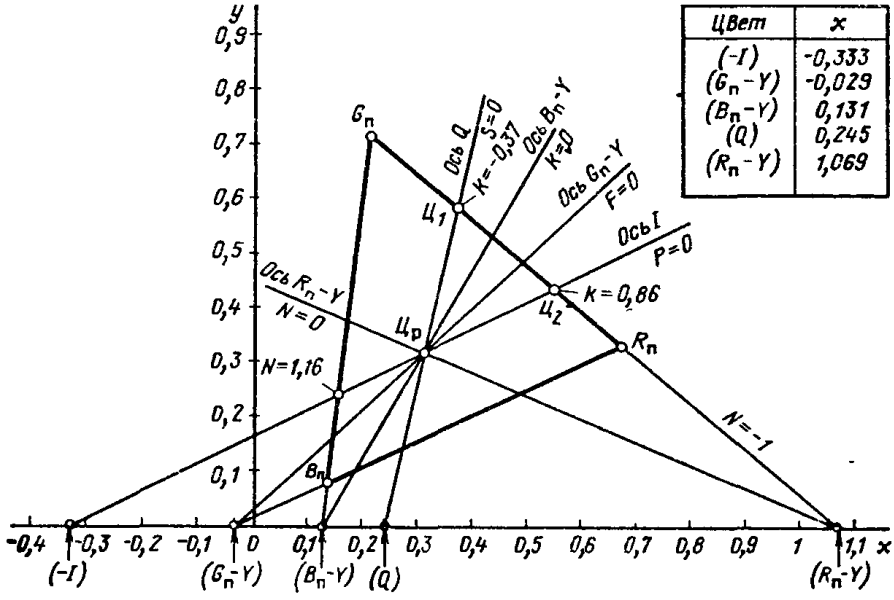


Рис. 4.8. Цвета $(-I)$, $(G_п-Y)$, $(B_п-Y)$, (Q), $(R_п-Y)$ и оси I, $G_п-Y$, $B_п-Y$, Q, $R_п-Y$ на диаграмме цветностей для треугольника основных цветов приемника NTSC и белого C в качестве равностимульного цвета $Ц_р$

приравняем друг другу первое и третье уравнения (3.156), подставим в них $N=-1$ и $K=-0{,}365$ и получим

$$\frac{x(p_1-q_1)+q_1}{K+p_1f_1+q_1(1+f_2)}=\frac{x(p_3-q_3)+q_3}{N+p_3f_1+q_3(1+f_2)}. \qquad (4.40)$$

Отсюда $x(p_1-q_1)n_2+q_1n_2=x(p_3-q_3)n_1+q_3n_1$, и для точки $Ц_1$ имеем

$$x_1=x_{Ц1}=(q_3n_1-q_1n_2)/[(p_1-q_1)n_2-(p_3-q_3)n_1];$$

$$n_1=K+p_1f_1+q_1(1+f_2);\ n_2=N+p_3f_1+q_3(1+f_2). \qquad (4.41)$$

Подставив (4.41) в третье уравнение (3.156), получим для точки $Ц_1$:

$$y=y_{Ц1}=\left[\frac{(q_3n_1-q_1n_2)(p_3-q_3)}{(p_1-q_1)n_2-(p_3-q_3)n_1}+q_3\right]\frac{1}{n_2}. \qquad (4.42)$$

Пусть $x_э$ и $y_э$ — координаты цветности точки $Ц_р$ (равностимульный эталонный цвет). Тогда, пользуясь (3.162), получим уравнение оси Q, как прямой, проходящей через точки $Ц_1$ и $Ц_р$

$$(y-y_{Ц1})/(y_э-y_{Ц1})=(x-x_{Ц1})/(x_э-x_{Ц1}). \qquad (4.43)$$

Обозначив

$$q_3 n_1 - q_1 n_2 = b_1;\ (p_1 - q_1) n_2 - (p_3 - q_3) n_1 = b_2;$$

$$\left[\frac{b_1 (p_3 - q_3)}{b_2} + q_3\right] \frac{1}{n_2} = c, \tag{4.44}$$

после простых преобразований из (4.43), получим

$$x_{Ц1} = b_1/b_2;\ y_{Ц1} = c; \tag{4.45}$$

$$y = [(x - b_1/b_2)(y_3 - c)/(x_3 - b_1/b_2)] + c. \tag{4.46}$$

Выражение (4.46) является уравнением оси Q. Координату точки пересечения оси Q с осью x, т. е. точки (Q), находим, подставив в (4.46) $y = 0$, что дает

$$x = x_{(Q)} = [-c\,(x_3 - b_1/b_2)/(y_3 - c)] + b_1/b_2. \tag{4.47}$$

Подставив сюда $x_3 = 0{,}31$; $y_3 = 0{,}316$ (белое C), получим $x_{(Q)} = 0{,}245$. Аналогично, обозначив

$$Q/Y = P, \tag{4.48}$$

используя (4.37), найдем

$$P = Q/Y = E_Q/E_Y = [0{,}48\,(R_п - Y) + 0{,}41\,(B_п - Y)]/Y. \tag{4.49}$$

Подставив сюда $P = 0$, имеем

$$(R_п - Y)/Y = -0{,}86\,(B_п - Y)/Y. \tag{4.50}$$

Найдем на диаграмме цветностей x, y на линии $R_п G_п$ точку $Ц_2$, удовлетворяющую этому условию. На этой линии $N = -1$ из рис. 3.29. Подставив $N = (B_п - Y)/Y = -1$ в (4.50), найдем, что точка $Ц_2$ на линии $R_п G_п$, удовлетворяющая условию (4.50), соответствует значению $(R_п - Y)/Y = 0{,}86$, т. е. $K = 0{,}86$. На линии $B_п G_п$ имеем $K = (R_п - Y)/Y = -1$; подставив $K = -1$ в (4.50), получим $N = (B_п - Y)/Y = 1{,}16$, т. е. точка на линии $B_п G_п$, имеющая $N = 1{,}16$, также удовлетворяет условию (4.50) и лежит на прямой, соединяющей точки $Ц_р$ и $Ц_2$ и называемой осью I, так как на ней $Q = 0$ исходя из (4.48). Для оси I справедливы (4.46) и (4.47), но для n_1 и n_2 в (4.41) в этом случае следует подставить $K = 0{,}86$ и $N = -1$. Из (4.47) получаем, что ось I пересекает ось x в точке с координатами $x = 0{,}333$; $y = 0$. Эта точка представляет цвет $(-I)$. Можно было точку $(-I)$ найти графически, построив ось I путем проведения прямой через точки $Ц_2$ и $Ц_р$. Почему точка пересечения оси I с осью x представляет цвет $(-I)$, а не (I), станет ясно из рис. 4.9, на котором по аналогии с рис. 3.30 построены линии постоянных значений нормализованных линейных сигналов S и P из (4.38) и (4.49). Через точку $Ц_р$ здесь проходят линии для $S = P = 0$. Из рис. 4.9 видно, что значения S увеличиваются по абсолютной величине при приближении вдоль линии $P = \text{const}$ к точке $x = -0{,}333$; $y = 0$, поэтому эта точка является цветом $(-I)$, а не $(+I)$. На рис. 4.8 показаны также цвета

$(R_п - Y)$, $(B_п - Y)$. $(G_п - Y)$ и прямые, соединяющие их с точкой $Ц_р$. Назовем эти прямые осями $R_п - Y$, $B_п - Y$, $G_п - Y$ соответственно. Для них справедливо $N = 0$, $K = 0$, $F = 0$.

Линии постоянных значений $S = I/Y$, построенные на рис. 4.9, представляют собой пучок прямых из точки (Q). Для построения этого пучка воспользуемся тем, что в точке $R_п$ имеем $E_G = E_B = 0$ и из (4.24) и (3.168) $E_I = 0{,}6\,E_R$; $E_Y = 0{,}3\,E_B$, откуда в этой точке из (4.38) $S = E_I/E_Y = I/Y = 0{,}6\,E_R/(0{,}3\,E_R) = 2$. Следовательно, точки пересечения прямых (Q) $Ц_I$ и (Q) $R_п$ с прямой, параллельной алихне (т. е. оси x), удалены друг от друга на расстояние, равное двум единицам для величины S на этой прямой. Это позволяет построить равномерную шкалу S на этой прямой и с ее помощью построить линии $S = \text{const}$ (пучок прямых, исходящих из точки (Q)).

Для построения на рис. 4.9 пучка прямых из точки $(-I)$, представляющих собой линии постоянных значений $P = Q/Y$, воспользуемся тем, что в точке $B_п$ имеем $E_R = E_G = 0$ и из (4.24) и (3.158) $E_Q = -0{,}31\,E_B$; $E_Y = 0{,}114\,E_B$, откуда в этой точке $P = E_Q/E_Y = Q/Y = (0{,}31\,E_B)/(0{,}114\,E_B) = 2{,}74$. Аналогично построению линий $S = \text{const}$ построим отрезок, равный единице для величины P на прямой, параллельной алихне (оси x) и проходящей через точку $B_п$, далее строим на ней равномерную шкалу P и с ее помощью строим линии $P = \text{const}$, т. е. пучок лучей, исходящих из точки $(-I)$, показанные на рис. 4.9.

Рассмотрим еще отношения $S' = E'_I/E_Y^{1/\gamma_{гк}}$ и $P' = E'_Q/E_Y^{1/\gamma_{гк}}$. Используя (3.167) и (3.173), получим $E_Y^{1/\gamma_{гк}} = [(1/a)Y]^{1/\gamma_{гк}} = a'Y^{1/\gamma_{гк}}$. Подставив это выражение и E'_I и F'_Q из (4.23) в эти формулы для S' и P' и используя (3.180) и (3.181), получим

$$S' = E'_I/E^{1/\gamma_{гк}} = E'_I/(a'Y^{1/\gamma_{гк}}) = 0{,}74\,|E'_{R-Y}/(a'Y^{1/\gamma_{гк}})| -$$
$$-0{,}27\,|E'_{B-Y}/(a'Y^{1/\gamma_{гк}})| = 0{,}74K' - 0{,}27N';$$
$$P' = E'_Q/E_Y^{1/\gamma_{гк}} = E'_Q\,(a'Y^{1/\gamma_{гк}}) = 0{,}48\,|E'_{R-Y}\,(a'Y^{1/\gamma_{гк}})| +$$
$$+0{,}41\,|E'_{B-Y}/(a'Y^{1/\gamma_{гк}})| = 0{,}48K' + 0{,}41N'. \qquad (4.51)$$

Значения $K' = E'_{R-Y}/(a'Y^{1/\gamma_{гк}})$ и $N' = E'_{B-Y}/(a'Y^{1/\gamma_{гк}})$ были даны на рис. 3.36. Из этого рисунка находим значения K' и N' для каждой точки диаграммы цветностей x, y в пределах треугольника основных цветов приемника и из (4.51) получаем значения S' и P' для этих точек. Соединяя плавными кривыми точки с одинаковыми значениями S', получаем линии постоянных значений S', показанные на рис. 4.10. Аналогично построены линии $P' = \text{const}$.

По аналогии с рис. 3.37 на рис. 4.11 построены линии постоянных значений нормализованных нелинейных сигналов $S'' = E'_I/E'_Y$ и $P'' = E'_Q/E'_Y$. Используя (4.23), имеем $S'' = (0{,}74\,E'_{R-Y} - 0{,}27E'_{B-Y})/E'_Y$;

$P'' = (0{,}48\,E'_{R-Y} - 0{,}41\,E'_{B-Y})/E'_Y$. Из (3.20) имеем $E'_R = (R_п/a)^{1/\gamma_{гк}}$; $E'_B = (B_п/a)^{1/\gamma_{гк}}$; из (3.173) имеем $E'_Y = (1/a)^{1/\gamma_{гк}} Y'$. Подставив эти выражения в (4.1), получим $E'_{R-Y} = E'_R - E'_Y = (1/a)^{1/\gamma_{гк}} (R'_п - Y')$; $E'_{B-Y} = E'_B - E'_Y = (1/a)^{1/\gamma_{гк}} (B_п - Y')$, где $R'_п = R_п^{1/\gamma_{гк}}$; $B'_п = B_п^{1/\gamma_{гк}}$. Подставив эти выражения в формулы для S'' и P'', получим, используя (3.183) и (3.184) для K'' и P'', т.е. $K'' = (R'_п - Y')/Y'$; $P'' = (B'_п - Y')/Y'$:

$$S'' = E'_I/E'_Y = [0{,}74\,(R'_п - Y')/Y'] - [0{,}27\,(B'_п - Y')/Y'] = 0{,}74K'' - 0{,}27N'';$$

$$P'' = E'_Q/E'_Y = [0{,}48\,(R'_п - Y')/Y'] + [0{,}41\,(B'_п - Y')/Y'] = 0{,}48\,K'' + 0{,}41N''. \qquad (4.52)$$

Из рис. 3.37 находим для каждой точки диаграммы цветностей x, y в пределах треугольника основных цветов приемника значения K'' и и N'' и, подставляя их в (4.52), получаем значения S'' и P'' для этих точек. Соединяя плавными кривыми точки с одинаковыми значениями S'', получаем линии постоянных значений S'' на рис. 4.11. Аналогично построены линии постоянных значений P''. Линии (см. рис. 3.37), для которых справедливо $N'' = 0$ и $K'' = 0$, можно по аналогии с рис. 4.8 назвать осями $(R'_п - Y')/Y'$ и $(B'_п - Y')/Y'$. Аналогично можно назвать линии на рис. 4.11, для которых $P'' = 0$ и $S'' = 0$, осями I'/Y' и Q'/Y' (оси S'' и P''). На рис. 4.12 показаны все эти

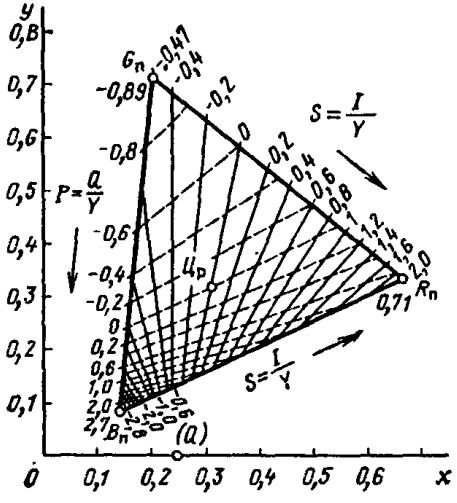


Рис. 4.9. Линии постоянных значений S и P на диаграмме цветностей x, y для треугольника основных цветов приемника NTSC и белого C в качестве $Ц_р$. Здесь $S = I/Y$, $P = Q/Y$

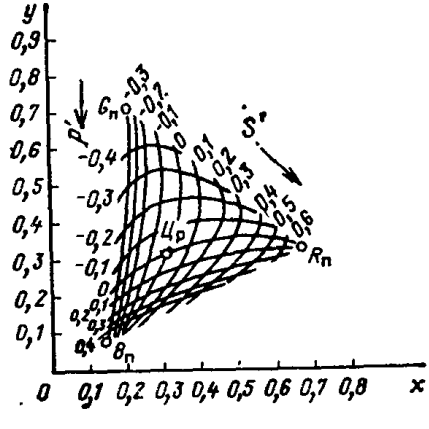


Рис. 4.10. Линии постоянных значений S' и P' для треугольника основных цветов приемника NTSC и белого C в качестве $Ц_р$ при $\gamma = 2.75$ (по Ф. Бингли). Здесь $S' = E'_I/(a'Y^{1/\gamma_{гк}})$; $P' = E'_Q/(a'Y^{1/\gamma_{гк}})$

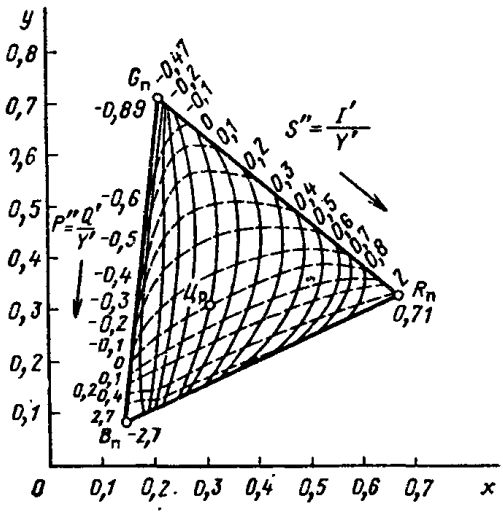


Рис. 4.11. Линии постоянных значений S'' и P'' на диаграмме цветностей x, y для треугольника основных цветов приемника NTSC и белого C в качестве $Ц_р$ при $\gamma=2{,}2$ (по Карнту и Таунсенду). Здесь $S''=I'/Y'$, $P''=Q'/Y'$

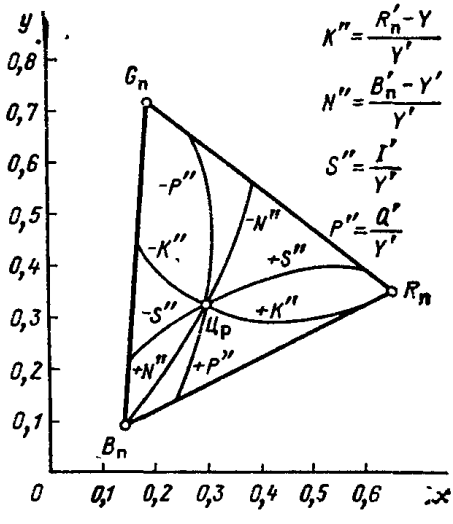


Рис. 4.12. Оси K'', N'', S'', P'' для треугольника основных цветов приемника NTSC и белого C в качестве $Ц_р$ при $\gamma=2{,}2$. Здесь $K''=(R'_п-Y')/Y'$; $N''=(B'_п-Y')/Y'$; $S''=I'/Y'$; $P''=Q'/Y'$

оси. Вправо от точки $Ц_р$ ось S'' пересекается линиями I'/Y', для которых S'' положительно, влево от точки $Ц_р$ ось S'' пересекается линиями I'/Y', для которых S'' отрицательно. Вверх от точки $Ц_р$ ось P'' пересекается линиями Q'/Y', для которых P'' отрицательно; вниз от точки $Ц_р$ ось P'' пересекается линиями Q'/Y', для которых P'' положительно. Аналогично определены знаки для осей K'' и N''. В табл. 3.14 были даны значения K, F, N, K'', N'' для вершин треугольника основных цветов приемника NTSC и белого C в качестве $Ц_р$ (от величины $\gamma_{гк}$ эти значения не зависят).

Таблица 4.1

Вершины треугольника	S	P	S''	P''
$R_п$	2	0,71	2	0,71
$G_п$	—0,47	—0,89	—0,47	—0,89
$B_п$	—2,8	2,74	—2,82	2,74

Линии постоянных значений S'' и P'' можно построить и расчетным путем. Для этого напишем исходя из (4.52), (4.22) и (4.35)

$$S''=K''M_1\cos 33^\circ-N''M_2\cos 57^\circ;$$

$$P''=K''M_1\cos 57^\circ+N''M_2\cos 33^\circ. \qquad (4.53)$$

Отсюда

$$K'' = (P' \cos 57 + S'' \cos 33)/M_1;$$

$$N'' = (P'' \cos 33 - S'' \cos 57)/M_2. \qquad (4.54)$$

Задаемся значением S'' и для разных значений P'' находим K'' и N'' из (4.54) и затем из (3.190) — X, Y, Z и по ним — x, y, z. Далее задаемся другим значением S'' и повторяем расчет. Таким образом будут получены линии постоянных значений S''. Затем задаемся значением P'' и для разных значений S'' находим K'' и N'' из (4.54) и далее из (3.190) — X, Y, Z и по ним — x, y, z. Повторяем расчет для другого значения P'' и т. д. Таким образом будут получены линии постоянных значений P''.

Восприятие наблюдателем цвета мелких предметов рассмотрено в § 1.4, 3.2, 4.1. Из сравнения рис. 4.8 и 4.9 с рис. 3.3 ... 3.5 видно, что выбор сигналов E'_I и E'_Q и осей I и Q соответствует свойствам нашего зрения, благодаря чему узкополосный сигнал E'_Q и широкополосный сигнал E'_I обеспечивают хорошее качество цветного изображения. Для оценки качества видеосигнала цветного телевидения, состоящего из сигнала яркости и двух цветоразностных сигналов, применяются следующие колориметрические критерии: для приемника цветного телевидения — верность цветопередачи и воспроизведения яркости цвета K_{LC}, выполнение принципа постоянной яркости K_L, верность воспроизведения яркости мелких деталей K_D, для приемника черно-белого телевидения при приеме сигнала цветного телевидения — критерий верности яркости изображения K_C.

Верность цветопередачи. Сигналы основных цветов E'_R, E'_G, E_B создают в приемнике цвет $Ц_п$ с координатами цвета $R_{п.и}$, $G_{п.и}$, $B_{п.и}$ в системе $R_пG_пB_п$. При $\gamma_{гк} = \gamma_к$ яркости свечения люминофоров при создании этого цвета равны исходя из (3.195) и по аналогии с выражениями (4.74) и (4.75), которые будут получены далее:

$$L_{Rи} = \alpha S (E'_R)^{\gamma_к} = \alpha S E_R;\ L_{Gи} = \beta S (E'_G)^{\gamma_к} = \beta S E_G;$$

$$L_{Bи} = \delta S (E'_B)^{\gamma_к} = \delta S E_B. \qquad (4.55)$$

Подставив (4.55) в (3.21), получим координаты цвета $Ц_п$:

$$R_{п.и} = (S\alpha / L_{[Rи]}) E_R;\ G_{п.и} = (S\beta / L_{[Gи]}) E_G;$$

$$B_{п.и} = (S\delta / L_{[Bи]}) E_B, \qquad (4.56)$$

где $L_{[Rи]}$, $L_{[Gи]}$, $L_{[Bи]}$ — яркости единичных количеств основных цветов приемника в системе $R_пG_пB_п$, установленные на равностимульном в этой системе цвете $Ц_р$, яркости единичных количеств которого

$$L_{[Ц_р]} = L_{[Rи]} + L_{Gи]} + L_{[Bи]};\ L_{[Rи]} = \alpha L_{[Ц_р]};$$

$$L_{[Gи]} = \beta L_{[Ц_р]};\ L_{[Bи]} = \delta L_{[Ц_р]}. \qquad (4.57)$$

Подставив (4.57) в (4.56), получим

$$R_{\text{п.и}} = (S/L_{[U_{\text{р}}]})E_R;\quad G_{\text{п.и}} = (S/L_{[U_{\text{р}}]})E_G;$$
$$B_{\text{п.и}} = (S/L_{[U_{\text{р}}]})E_B. \qquad (4.58)$$

Выражение (4.58) соответствует условиям (3.20), которые необходимы для неискаженной цветопередачи в соответствии с (3.15) и (3.14).

Верность воспроизведения яркости цвета в приемнике цветного телевидения оценивается коэффициентом

$$K_{LC} = L_{Ц\text{и}}/L_{\text{п.и}}, \qquad (4.59)$$

где $L_{Ц\text{и}}$ — яркость цвета $Ц_{\text{и}}$ изображения, создаваемого сигналами E'_R, E'_G, E'_B; $L_{\text{п.и}}$ — правильная яркость цвета $Ц_{\text{и}}$ в этом приемнике. При этом на основании (3.12) и (3.13) $L_{\text{п.и}} = CL_0$, где C — постоянный коэффициент, L_0 — яркость цвета оригинала (здесь $L_{Ц\text{и}}$ и $L_{\text{п.и}}$ — яркости на крупных участках изображения). Из (4.55) имеем $L_{Ц\text{и}} = L_{R\text{и}} + L_{G\text{и}} + L_{B\text{и}} = S[\alpha (E'_R)^{\gamma_{\text{к}}} + \beta (E'_G)^{\gamma_{\text{к}}} + \delta (E'_B)^{\gamma_{\text{к}}}]$. Из (3.33) имеем $(E'_R)^{\gamma_{\text{к}}} = (1/A'_R) R_{\text{п.и}}$; $(E'_G)^{\gamma_{\text{к}}} = (1/A'_G)G_{\text{п.и}}$; $(E'_B)^{\gamma_{\text{к}}} = (1/A'_B) B_{\text{п.и}}$. Подставив эти выражения в формулу для $L_{Ц\text{и}}$, написанную выше, получим $L_{Ц\text{и}} = Sd(\alpha R_{\text{п.и}} + \beta G_{\text{п.и}} + \delta B_{\text{п.и}})$, где $d = (1/A'_R) = (1/A'_G) = (1/A'_B)$. Для яркости передаваемой сцены по аналогии с (3.80) напишем $L_0 = \varepsilon Y_0 = \varepsilon(\alpha R_{\text{п.о}} + \beta G_{\text{п.о}} + \delta B_{\text{п.о}})$, где ε — коэффициент для перехода от световатт к кд/м^2. Отсюда $L_{\text{п.и}} = CL_0 = C\varepsilon(\alpha R_{\text{п.о}} + \beta G_{\text{п.о}} + \delta B_{\text{п.о}})$. Подставив полученные выражения для $L_{Ц\text{и}}$ и $L_{\text{п.и}}$ в (4.59), получим

$$K_{LC} = (\alpha R_{\text{п.и}} + \beta G_{\text{п.и}} + \delta B_{\text{п.и}})/(\alpha R_{\text{п.о}} + \beta G_{\text{п.о}} + \delta B_{\text{п.о}}) \qquad (4.60)$$

при $Sd/(C\varepsilon) = 1$.

При $R_{\text{п.и}} = R_{\text{п.о}}$; $G_{\text{п.и}} = G_{\text{п.о}}$; $B_{\text{п.и}} = B_{\text{п.о}}$ получим $K_{LC} = 1$. Это условие должно соблюдаться для всех цветов. Критерии верности цветопередачи K_{LC}, K_L, K_D при передаче сигнала яркости $E_M = E_Y^{1/\gamma_{\text{гк}}}$ вместо сигнала E'_Y, а также методы передачи цветного изображения с сигналом яркости $E_Y^{1/\gamma}$ от отдельной передающей трубки и система передачи «Дельта-L» рассматриваются в литературе [47, см § 3.17 и 3.18 и с. 331—352].

Матричные схемы. Для получения сигнала E'_Y из (4.17), цветоразностных сигналов E'_{R-Y}, E'_{G-Y}, E'_{B-Y} из (4.14) или из (4.25), сигналов E'_I и E'_Q из (4.24), сигналов E'_R, E'_G, E'_B из (4.27) применяются матричные схемы. Так как точность вышеуказанных сигналов должна быть высокой (ошибка не более 1 %), применяют *пассивную матричную схему*, показанную на рис. 4.13, в которой сложение сигналов, взятых со знаками «плюс» или «минус», «происходит без участия активных элементов (сигнал со знаком «минус» получается до этой матрицы из сигнала со знаком «плюс» путем поворота его фазы на 180° в транзисторном каскаде усиления).

Для схемы рис. 4.13 можно написать

$$e_0 = p\,(x_1 e_1 + x_2 e_2 + x_3 e_3) = p_1 e_1 + p_2 e_2 + p_3 e_3;$$

$$p_1 = p x_1;\ p_2 = p x_2;\ p_3 = p x_3. \qquad (4.61)$$

Здесь x_1, x_2, x_3 известны из (4.17) для E'_Y и из (4.14) для E'_{R-Y} и E'_{B-Y}. Величиной p необходимо задаваться. Полагая $e_2 = e_3 = 0$, через проводимости Y_1, Y_2, Y_3, Y_0, Y_c получим

$$p_1 = e_0/e_1 = Y_1/(Y_0 + Y_1 + Y_2 + Y_3) = Y_1/Y_c, \qquad (4.62)$$

$$Y_1 = 1/R_1;\ Y_2 = 1/R_2;\ Y_3 = 1/R_3;\ Y_0 = 1/R_0, \qquad (4.63)$$

$$Y_c = Y_0 + Y_1 + Y_2 + Y_3. \qquad (4.64)$$

Аналогично получим

$$p_2 = e_0/e_2 = Y_2/Y_c;\ p_3 = e_0/e_3 = Y_3/Y_c;$$

$$p_1 + p_2 + p_3 = (Y_1 + Y_2 + Y_3)/Y_c. \qquad (4.65)$$

Из (4.64), используя (4.65), получим

$$1 = (Y_0/Y_c) + (Y_1 + Y_2 + Y_3)/Y_c = (Y_0/Y_c) + (p_1 + p_2 + p_3), \qquad (4.66)$$

откуда

$$Y_0/Y_c = 1 - (p_1 + p_2 + p_3). \qquad (4.67)$$

Из (4.56) и (4.61) получим

$$R_1/R_0 = Y_0/Y_1 = (Y_c/Y_1)\,(Y_0/Y_c) = [1 - (p_1 + p_2 + p_3)]/p_1. \qquad (4.68)$$

Аналогично из (4.65) и (4.67) имеем

$$R_2/R_0 = (Y_c/Y_2)\,(Y_0/Y_c) = [1 - (p_1 + p_2 + p_3)]/p_2;$$

$$R_3/R_0 = (Y_c/Y_3)\,(Y_0/Y_c) = [1 - (p_1 + p_2 + p_3)]/p_3. \qquad (4.69)$$

Для сигналов E'_Y из (4.7) и E'_{R-Y}, E'_{G-Y}, E'_{B-Y} из (4.14) принято использовать коэффициенты α, β, δ из (3.57). Тогда для сигнала E'_Y имеем $x_1 = \alpha \approx 0{,}3$; $x_2 = \beta \approx 0{,}59$; $x_3 = \delta \approx 0{,}11$. Берем $p = 0{,}7$. Тогда из (4.55) имеем $p_1 = 0{,}7 \cdot 0{,}3$; $p_2 = 0{,}7 \cdot 0{,}59$; $p_3 = 0{,}7 \cdot 0{,}11$. Берем далее $R_0 = 315$ Ом. Тогда имеем из (4.62) и (4.63) для R1, R2, R3 соответственно 451; 228,5 и 1232 Ом; вычитая из этих значений внутреннее сопротивление источников сигналов e_1, e_2, e_3 (если таковыми являются транзисторы, то их внутреннее сопротивление примерно 5 Ом), получим сопротивление резисторов, которые необходимо применить в матричной схеме. Точность и стабильность их сопротивлений во времени должны быть высокими (0,2 ... 0,3%). Собственная емкость резисторов должна быть малой, чтобы не влиять на амплитудно-частотную

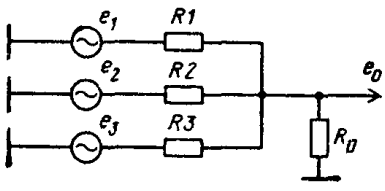


Рис. 4.13. Пассивная матричная схема

характеристику матрицы (сопротивление R_0 поэтому должно быть достаточно малым). Необходимо при этом отметить, то сигналы e_1, e_2, e_3 должны иметь хорошее совмещение во времени. Для получения в приемнике сигналов E'_{G-Y}, E'_R, E'_G, E'_B с помощью матричных схем (в декодерах) так же, как и в матричных схемах на передающей стороне (в кодерах), применяются коэффициенты α, β, δ из (3.57). Это обеспечивает получение на выходе матриц декодера таких же сигналов, как и на входе матриц кодера, т. е. искажения в них при кодировании — — декодировании не вносятся. Таким образом, получают сигналы из (4.7) и (3.57) и (4.17) соответственно:

$$E'_Y = 0{,}29891E'_R + 0{,}58662E'_G - 0{,}11448E'_B, \tag{4.70}$$

$$E'_{G-Y} = -0{,}50953E'_{R-Y} - 0{,}19515E'_{B-Y}. \tag{4.71}$$

4.2. ПРИНЦИП ПОСТОЯННОЙ ЯРКОСТИ

В приемнике в результате детектирования сигнала цветности на цветовой поднесущей цветоразностные сигналы переводятся в область видеоспектра вместе с шумами и помехами, добавленными к сигналу цветности в тракте передачи и на входе приемника. При этом частоты шумов и помех на входе приемника, близкие к частоте цветовой поднесущей, после детектирования становятся близкими к частоте полей $f_п$ (например, 50 Гц), поэтому их структура в изображении на экране становится крупной (грубой) и поэтому их заметность может быть большой, если они изменяют яркость изображения. Необходимо, чтобы изменения яркости изображения в приемнике шумами и помехами в сигнале цветности были бы минимальными.

Было установлено, что если помеха изменяет цветность изображения без изменения его яркости, размах напряжения такой помехи может быть на 6 ... 8 дБ больше, чем для помехи, изменяющей яркость изображения (при одинаковой заметности помехи в изображении). Это происходит потому, что наш глаз гораздо более чувствителен к изменению яркости, чем к изменениям цветности. Поэтому необходимо, чтобы цветоразностные сигналы вместе с шумами и помехами создавали только изменения цветности изображения, не изменяя его общей яркости. Это условие называется *принципом постоянной яркости* [55, 123, 124]. Для выполнения этого принципа необходимо, чтобы сигналы E'_R, E'_G, E'_B, формируемые в приемнике из принимаемых сигналов яркости и цветности (см. рис. 4.1) и подаваемые на цветной кинескоп, создавали полную яркость изображения только от сигнала яркости, а не от сигналов цветности и содержащихся в них шумов и помех. Это выполнимо, если в приемник передается отдельный сигнал яркости, не содержащий информации о цветности передаваемой сцены, а содержащий информацию о ее яркости. Информация о цветности сцены должна передаваться сигналом цветности, не содержащим информации о ее яркости. В линейном кинескопе ($\gamma_к = 1$) этот принцип выполняется, если информация о яркости передаваемой сцены передается линейным

сигналом E_Y из (4.3), а информация о ее цветности передается с помощью линейных цветоразностных сигналов E_{R-Y} и E_{B-Y} из (4.1), причем на равносигнальном (равностимульном в системе $R_пG_пB_п$) эталонном цвете $Ц_{рс}$ эти сигналы должны быть равны нулю, как это следует из (4.30), а на малонасыщенных цветах должны быть малы.

Линейные сигналы и линейный приемник ($\gamma_{п.т} = \gamma_{гк} = \gamma_к = 1$). Покажем, что линейные цветоразностные сигналы не создают изменений яркости изображения на экране линейного кинескопа. Для этого на основании (3.195) напишем

$$L_{Rи} = S_{1R} E_R;\ L_{Gи} = S_{1G} E_G;\ L_{Bи} = S_{1B} E_B. \tag{4.72}$$

По аналогии с (3.205) и (3.133) с учетом (4.72) имеем

$$L_{Rи.рс} = \alpha L_{Црс} = S_{1R} E_{рс};\ L_{Gи\ рс} = \beta L_{Црс} = S_{1G} E_{рс};$$
$$L_{Bи\ рс} = \delta L_{Црс} = S_{1B} E_{рс}, \tag{4.73}$$

откуда

$$S_{1R} = \alpha S;\ S_{1G} = \beta S;\ S_{1B} = \delta S;\ S = L_{Црс}/E_{рс}. \tag{4.74}$$

Подставив (4.74) в (4.72), получим для любого цвета

$$L_{Rи} = \alpha S E_R;\ L_{Gи} = \beta S E_G;\ L_{Bи} = \delta S E_B, \tag{4.75}$$

где α, β, δ — из (3.56).

Полная яркость $L_и$ цвета $Ц$ в изображении на экране линейного кинескопа из (3.24), (4.75) и (4.3)

$$L_и = L_{Rи} + L_{Gи} + L_{Bи} = S(\alpha E_R + \beta E_G + \delta E_B) = S E_Y, \tag{4.76}$$

т. е. $L_и$ создается сигналом E_Y.

Допустим, что сигнал яркости $E_Y = 0$, а на кинескоп подаются только три сигнала E_{R-Y}, E_{G-Y}, E_{B-Y}. Подставим эти сигналы в (4.76) вместо E_R, E_G, E_R, используя (4.1) и (3.35), получим

$$L_и = S(\alpha E_{R-Y} + \beta E_{G-Y} + \delta E_{B-Y}) =$$
$$= S(\alpha E_R - \alpha E_Y + \beta E_G - \beta E_Y + \delta E_B - \delta E_Y) = 0. \tag{4.77}$$

Таким образом, сигналы E_{R-Y}, E_{G-Y}, E_{B-Y} не создают яркости в изображении на экране линейного кинескопа, т. е. соблюдается принцип постоянной яркости.

Теперь допустим, что $E_Y \neq 0$, а к сигналам E_{R-Y} и E_{B-Y} добавлены напряжения помех $E_{пR}$ и $E_{пB}$ соответственно. В этом случае по аналогии с (4.15) имеем

$$E_{G-Y} = -(\alpha/\beta)(E_{R-Y} + E_{пR}) - (\delta/\beta)(E_{B-Y} + E_{пB}). \tag{4.78}$$

Находим E_R, E_G, E_B аналогично (3.172) и, подставив полученный результат $E_R = E_{R-Y} + E_Y + E_{пR}$; $E_B = E_{B-Y} + E_Y + E_{пB}$; $E_G = E_{G-Y} + E_Y$ в (4.76), используя (4.78) и (4.15), получим

$$L_и = S\{\alpha(E_{R-Y} + E_{пR} + E_Y) + \beta[-(\alpha/\beta)(E_{R-Y}) + E_{пR}) -$$
$$-(\delta/\beta)(E_{B-Y} + E_{пB}) + E_Y] + \delta(E_{B-Y} + E_{пB} + E_Y)\} = S E_Y, \tag{4.79}$$

т. е. на яркость $L_{\text{и}}$ помехи $E_{\text{п}R}$ и $E_{\text{п}B}$ не влияют (то же, если действует только одна из этих помех). Это объясняется тем, что в этом случае помехи в сигнале E_{G-Y}, формируемом в приемнике из сигналов $E_{R-Y} + E_{\text{п}R}$ и $E_{B-Y} + E_{\text{п}B}$, подаются на кинескоп в обратной фазе по отношению к помехам в сигналах $E_{R-Y} + E_{\text{п}R}$ и $E_{B-Y} + E_{\text{п}B}$ и компенсируют их влияние на яркость $L_{\text{и}}$.

Рассмотрим, как при передаче равносигнального цвета $Ц_{\text{рс}}$ будут изменяться координаты цвета свечения экрана линейного кинескопа при $E_Y \neq 0$ и действии помехи $E_{\text{п}R}$ в канале сигнала E_{R-Y}, и пусть при этом $E_{\text{п}B} = 0$ (для $Ц_{\text{рс}}$ имеем $E_{R-Y} = E_{B-Y} = 0$). Пусть в этом случае $E_Y = 1$ и $L_{\text{и}} = L_{Ц\,\text{рс}} = 1$. Тогда из (4.73) $L_{R\text{и.рс}} = \alpha$, т. е. $Y_R = \alpha$, так как $Y_R = L_{R\text{и.рс}}$. Отсюда модули и координаты цвета $R_{\text{п}}$ соответственно:

$$m_R = Y_R/y_R = L_{R\text{и рс}}/y_R = \alpha/y_R;\ X_R = m_R x_R;\ Z_R = m_R z_R. \qquad (4.80)$$

Аналогично для цветов $G_{\text{п}}$ и $B_{\text{п}}$ имеем $Y_G = L_{G\text{и.рс}} = \beta$; $Y_B = L_{B\text{и.рс}} = \delta$ и отсюда

$$m_G = Y_G/y_G = L_{G\text{и.рс}}/y_G = \beta/y_G;\ X_G = m_G x_G;\ Z_G = m_G z_G;$$
$$m_B = Y_B/y_B = L_{B\text{и.рс}}/y_B = \delta/y_B;\ X_B = m_B x_B;\ Z_B = m_B z_B. \qquad (4.81)$$

Для получения цвета $Ц_{\text{рс}}$ количества основных цветов приемника в трихроматических единицах в системе XYZ:

$$Ц'_R = X_R(X) + Y_R(Y) + Z_R(Z) = m_R x_R(X) + m_R y_R(Y) + m_R z_R(Z) = (\alpha/y_R)[x_R(X) + y_R(Y) + z_R(Z)];$$
$$Ц'_G = X_G(X) + Y_G(Y) + Z_G(Z) = m_G x_G(X) + m_G y_G(Y) + m_G z_G(Z) = (\beta/y_G)[x_G(X) + y_G(Y) + z_G(Z)];$$
$$Ц'_B = X_B(X) + Y_B(Y) + Z_B(B) = m_B x_B(X) + m_B y_B(Y) + m_B z_B(Z) = (\delta/y_B)[x_B(X) + y_B(Y) + z_B(B)]. \qquad (4.82)$$

Если свечения люминофоров создаются сигналами e_R, e_G, e_B, отличными от $E_Y = 1$, то количества основных цветов приемника

$$Ц_R = Ц'_R e_R;\ Ц_G = Ц'_G e_G;\ Ц_B = Ц'_B e_B. \qquad (4.83)$$

Смесь этих цветов дает цвет

$$Ц_{\text{рс}} = Ц_R + Ц_G + Ц_B. \qquad (4.84)$$

В рассматриваемом случае $E_{\text{п}B} = 0$, поэтому

$$e_R = E_Y + E_{\text{п}R};\ e_G = E_Y - (\alpha/\beta)\,E_{\text{п}R};\ e_B = E_Y, \qquad (4.85)$$

так как $E_{R-Y} = E_{\text{п}R}$; $E_{B-Y} = 0$ и из (4.15) имеем $e_G = -(\alpha/\beta)\,E_{\text{п}R}$. Подставив (4.85) и (4.82) в (4.83) и результат в (4.84), имеем

$$Ц_{\text{рс}} = [(\alpha/y_R)\,x_R(X) + \alpha(Y) + (\alpha/y_R)\,z_R(Z)][(E_Y + E_{\text{п}R}) + [(\beta/y_G)\,x_G(X) + \beta(Y) + (\beta/y_G)\,z_G(Z)][E_Y - (\alpha/\beta)\,E_{\text{п}R}] +$$

$$+[(\delta/y_B)\,x_B(X)+\delta(Y)+(\delta/y_B)\,z_B(Z)]\,E_Y=$$
$$=\{(\alpha/y_R)\,x_R(E_Y+E_{\text{п}R})+(\beta/y_G)\,x_G[E_Y-(\alpha/\beta)\,E_{\text{п}R}]+$$
$$+(\delta/y_B)\,x_B E_Y\}(X)+\{\alpha(E_Y+E_{\text{п}R})+\beta[E_Y-(\alpha/\beta)\,E_{\text{п}R}]+$$
$$+\delta E_Y\}(Y)+\{(\alpha/y_R)\,z_R(E_Y+E_{\text{п}R})+(\beta/y_G)\,z_G\times$$
$$\times[E_Y-(\alpha/\beta)\,E_{\text{п}R}]+(\delta/y_B)\,z_B E_Y\}(Z)=X_{\text{рс}}(X)+$$
$$+Y_{\text{рс}}(Y)+Z_{\text{рс}}(Z). \qquad (4.86)$$

Рассмотрим координату цвета $Y_{\text{рс}}$, которая представляет яркость цвета $Ц_{\text{рс}}$, т. е. $L_{\text{п}}=Y_{\text{рс}}$. После простых преобразований из (4.86) получим $Y_{\text{рс}}=E_Y$, так как $\alpha+\beta+\delta=1$. Таким образом, яркость цвета $Ц_{\text{рс}}$ зависит только от E_Y и не зависит от $E_{\text{п}R}$. Следовательно, выполняется принцип постоянной яркости. Координаты цвета $X_{\text{рс}}$ и $Z_{\text{рс}}$ в (4.86) зависят от E_Y и $E_{\text{п}R}$. Если $E_{\text{п}R}$ изменяется во времени, то изменяются $X_{\text{рс}}$ и $Z_{\text{рс}}$, и поэтому цветность цвета $Ц_{\text{рс}}$ также изменяется под действием помехи $E_{\text{п}R}$, поступающей из канала сигнала E_{R-Y}.

Отметим, что если передавать в приемник три сигнала E_Y, E_R и E_B и получать в соответствии с (4.3) сигнал $E_G=(1/\beta)\,(E_Y-\alpha E_R-\delta E_B)$, то помехи, $E_{\text{п}}$, добавленные к сигналам E_R и E_B или к одному из них, не влияют на яркость изображения в линейном кинескопе. Действительно, подставляя в (4.76) $E_R+E_{\text{п}R}$ вместо E_R, $E_B+E_{\text{п}R}$ вместо E_B и $(1/\beta)\,[E_Y-\alpha(E_R+E_{\text{п}R})-\delta(E_B+E_{\text{п}B})$ вместо E_G, получим $L_{\text{п}}=SE_Y$. Таким образом, в линейном приемнике помехи в сигналах E_{R-Y} и E_{B-Y} или E_R и E_B на яркость $L_{\text{п}}$ не влияют, а изменяют только цветность изображения. Поэтому здесь уменьшается заметность в изображении помех от гетеродинов других приемников, шумов в канале сигналов цветности и в канале сигналов цветовой синхронизации, перекрестных помех от высокочастотных составляющих сигнала яркости, проходящих в канал сигналов цветности приемника; уменьшается влияние нелинейности канала сигналов цветности и фазовых искажений в них вблизи частоты цветовой поднесущей.

Нелинейные сигналы и нелинейный приемник ($\gamma_{\text{к}}\neq 1$; $\gamma_{\text{пт}}\neq 1$; $\gamma_{\text{гк}}\neq 1$). Из (4.10) и (4.11) имеем $E'_Y<E_Y^{1/\gamma_{\text{гк}}}$; $Y'<Y^{1/\gamma_{\text{гк}}}$; $(Y')^{\gamma_{\text{к}}}<Y$. Сигнал $E_Y^{1/\gamma_{\text{гк}}}$ содержит полную информацию о яркости передаваемой сцены. Следовательно, сигнал яркости E'_Y содержит только часть информации о яркости передаваемой сцены. В цветном нелинейном приемнике при передаче сигналов E'_Y, E'_{R-Y}, E'_{B-Y} яркость изображения воспроизводится правильно, так как прожекторы кинескопа управляются в этом случае сигналами основных цветов E'_R, E'_G, E'_B. Это означает, что часть яркости изображения создается сигналами E'_{R-Y} и E'_{B-Y}, поэтому не соблюдается принцип постоянной яркости, особенно для высоконасыщенных цветов. На равносигнальном эталонном цвете $E_{Y\text{рс}}^{1/\gamma_{\text{гк}}}=E'_{Y\text{рс}}$, как это следует из (4.12), а цветоразностные сигналы равны нулю из (4.13), поэтому на этом цвете вся яркость изображения создается сигналом яркости E'_Y.

Несоблюдение принципа постоянной яркости приводит к следующим недостаткам;

1) в нелинейном приемнике информация о яркости мелких деталей не может быть правильно воспроизведена в изображении, так как узкополосные цветоразностные сигналы не содержат необходимой части информации о яркости этих деталей;

2) так как $E'_Y < E_Y^{1/\gamma_{гк}}$, то отношение сигнала к шуму в сигнале E'_Y хуже, чем в сигнале $E_Y^{1/\gamma_{гк}}$;

3) содержание информации о яркости в нелинейных сигналах E'_{R-Y} и E'_{B-Y} означает, что они увеличены по амплитуде по сравнению с линейными сигналами E_{R-Y} и E_{B-Y}, что ухудшает совместимость системы цветного телевидения (увеличивается заметность сигнала цветности в изображении в черно-белых телевизорах). Яркости свечения люминофоров кинескопа в нелинейном приемнике получим из (3.195):

$$L_{Rи} = S_{1R}(E'_R)^{\gamma_{кR}};\ L_{Gи} = S_{1G}(E'_G)^{\gamma_{кG}};\ L_{Bи} = S_{1B}(E'_B)^{\gamma_{кB}}. \qquad (4.87)$$

Подставив сюда (4.74) для S_{1R} и E'_R из (4.21) получим

$$L_{Rи} = S\alpha(E'_{R-Y} + E'_Y)^{\gamma_{кR}} \quad S\alpha(E'_Y)^{\gamma_{кR}}[1 + (E'_{R-Y}/E'_Y)]^{\gamma_{кR}}. \qquad (4.88)$$

Разложим (4.88) в ряд

$$(1+x)^\gamma = 1 + \gamma x + \gamma(\gamma-1)x^2/2! + \gamma(\gamma-1)(\gamma-2)x^3/3! + \ldots \qquad (4.89)$$

Тогда из (4.88) получим

$$L_{Rи} = S\alpha(E'_Y)^{\gamma_{кR}}[1 + \gamma_{кR}(E'_{R-Y}/E'_Y) + \\ + \gamma_{кR}(\gamma_{кR}-1)(E'_{R-Y}/E'_Y)^2/2! + \ldots \qquad (4.90)$$

Аналогично находим $L_{Gи}$ и $L_{Bи}$. Обозначим нормализованную величину яркости изображения

$$L'_и = L_и/[S(E'_Y)^{\gamma_к}]. \qquad (4.91)$$

Величина (4.91) — отношение полной яркости изображения $L_и$ к яркости, создаваемой сигналом яркости, равной $S(E'_Y)^{\gamma_к}$. Подставив (4.76) в (4.91) и используя (4.90) для $L_{Rи}$, $L_{Gи}$ и $L_{Bи}$ при $\gamma_{кR} = -\gamma_{кG} = \gamma_{кB} = \gamma_к$, имеем

$$L'_и = \frac{L_{Rи}+L_{Gи}+L_{Bи}}{S(E'_Y)^{\gamma_к}} = (\alpha+\beta+\delta) + \gamma_к\left[\alpha\frac{E'_{R-Y}}{E'_Y} + \right. \\ \left. + \beta\frac{E'_{G-Y}}{E'_Y} + \delta\frac{E'_{B-Y}}{E'_Y}\right] + \frac{\gamma_к(\gamma_к-1)}{2!}\left[\alpha\left(\frac{E'_{R-Y}}{E'_Y}\right)^2 + \beta\left(\frac{E'_{G-Y}}{E'_Y}\right)^2 + \right. \\ \left. + \delta\left(\frac{E'_{B-Y}}{E'_Y}\right)^2\right] + \ldots \qquad (4.92)$$

Но $\alpha+\beta+\delta=1$. Для второго члена (4.92) имеем

$\alpha E'_{R-Y}+\beta E'_{G-Y}+\delta E'_{B-Y}=\alpha E'_R-\alpha E'_Y+\beta E'_G-\beta E'_Y+\delta E'_B-\delta E'_Y=$
$=E'_Y-E'_Y(\alpha+\beta+\delta)=0$. Следовательно,

$$L'_и=1+\frac{\gamma_к(\gamma_к-1)}{2!}\left[\alpha\left(\frac{E'_{R-Y}}{E'_Y}\right)^2+\beta\left(\frac{E'_{G-Y}}{E'_Y}\right)^2+\right.$$

$$\left.+\delta\left(\frac{E'_{B-Y}}{E'_Y}\right)^2\right]+\ldots \qquad (4.93)$$

Здесь первый член создается сигналом яркости E'_Y, второй член представляет собой долю яркости второго порядка, созданную цветоразностными сигналами и отражает отклонение от принципа постоянной яркости (при $\gamma_к=2$ все члены в (4.89) с x^3 и выше содержат множитель $\gamma_к-2=0$ и поэтому равны нулю).

Исследуем зависимость постоянных значений $L'_и$ от относительных значений сигналов E'_{R-Y} и E'_{B-Y}. Для этого обозначим

$$E'_{R-Y}/E'_Y=\xi;\quad E'_{B-Y}/E'_Y=\eta. \qquad (4.94)$$

Подставив (4.94) в (4.15), получим

$$E'_{G-Y}/E'_Y=-(\alpha/\beta)\,\xi-(\delta/\beta)\,\eta. \qquad (4.95)$$

Подставив (4.94) и (4.95) в (4.93) при $\gamma_к=2$, получим

$$L'_и=1+\left[\alpha\xi^2+\beta\left(-\frac{\alpha}{\beta}\xi-\frac{\delta}{\beta}\eta\right)^2+\delta\eta^2\right]=1+$$

$$+\left[\alpha\xi^2+\frac{\alpha^2}{\beta}\xi^2+\frac{2\alpha\delta}{\beta}\xi\eta+\frac{\delta^2}{\beta}\eta^2+\delta\eta^2\right], \qquad (4.96)$$

откуда $(\alpha+\alpha^2/\beta)\,\xi^2+(2\alpha\delta/\beta)\,\eta\xi+[(\delta^2/\beta)+\delta]\,\eta^2+1-L'_и=0$

или

$$a\xi^2+b\xi+c=0, \qquad (4.97)$$

где

$$a=(\alpha+\alpha^2/\beta);\quad b=2(\alpha\delta/\beta)\,\eta;\quad c=[(\delta^2/\beta)+\delta]\,\eta^2+1-L'_и. \qquad (4.98)$$

Решая (4.97) относительно ξ, получим $\xi=(-b\pm\sqrt{b^2-4ac})/(2a)$. Задаемся значениями $L'_и$ (например, 1,5; 2; 3; 5) для каждого из них находим ξ, задаваясь рядом значений η в области $\eta'<\eta<\eta''$, причем η' и η'' должны отвечать условию $b^2-4ac\geqslant 0$. Подставив сюда (4.98), получим

$$4\frac{\alpha^2\delta^2}{\beta^2}\eta^2-4\left(\alpha+\frac{\alpha^2}{\beta}\right)\left[\left(\frac{\delta^2}{\beta}+\delta\right)\eta^2+1-L'_и\right]\geqslant 0. \qquad (4.99)$$

Преобразуя (4.99), получим

$$\eta'=\pm\sqrt{M};\quad \eta''=-\sqrt{M};\quad M=(\beta/\delta)\,(1+\alpha/\beta)\,(L'_и-1). \qquad (4.100)$$

На рис. 4.14 по (4.98) построены линии постоянных значений $L'_{\text{н}}$ в прямоугольной системе координат ξ, η при $\gamma_{\text{к}} = 2$. Эти эллипсы пересекают ось ξ в точках ξ_1 и ξ_2, что соответствует условию $\eta = 0$, откуда $b = 0$; $c = 1 - L'_{\text{н}}$ и $a\xi^2 + c = 0$, т. е. $\xi_{1,2} = \pm\sqrt{-c/a}$. Ось η эти эллипсы пересекает в точках η_1 и η_2, что соответствует условию $\xi = 0$, откуда $c = 0$, т. е. $\delta[(\delta/\beta + 1]\eta^2 + 1 - L'_{\text{н}} = 0$, что дает $\eta_{1,2} = \pm \pm \sqrt{(L'_{\text{н}} - 1)[\delta(1 - \delta/\beta]^{-1}}$. Оси эллипсов могут не совпадать с осями ξ и η, а быть наклонными к ним.

Найдем координаты ξ и η точек $R_{\text{п}}$, $G_{\text{п}}$, $B_{\text{п}}$, образующих на рис. 4.14 вершины треугольника NTSC из табл. 3.4, беря значения E'_{R-Y}, E'_{B-Y} и E'_Y для их цветов из табл. 4.2 при $\alpha = 0{,}3$; $\beta = 0{,}59$; $\delta = 0{,}11$.

Таблица 4.2

Основной цвет	E'_R	E'_G	E'_B	E'_Y	E'_{R-Y}	E'_{B-Y}	ξ	η
$R_{\text{п}}$	1	0	0	0,3	0,70	−0,3	0,70/0,30=2,34	−0,30/0,30=−1
$G_{\text{п}}$	0	1	0	0,59	−0,59	−0,59	−0,59/0,59=−1	−0,59/0,59=−1
$B_{\text{п}}$	0	0	1	0,11	−0,11	0,89	−0,11/0,11=−1	0,89/0,11=8,1

Полученные значения ξ и η даны в табл. 4.2. Из рис. 4.14 следует: а) при одинаковом расстоянии точек от начала координат (лежащих на окружности с радиусом $\sqrt{\xi^2+\eta^2}$) значения их яркости $L'_{\text{н}}$ зависят от отношения ξ/η; б) при постоянном отношении ξ/η значение $L_{\text{н}}$ в точке на графике зависит от ее расстояния от начала координат; в) полная яркость свечения экрана $L'_{\text{н}}$ больше, чем яркость, создаваемая сигналом яркости E'_Y, особенно на насыщенных цветах, вследствие нарушения принципа постоянной яркости (за счет сигнала, поступающего на кинескоп из канала сигнала цветности приемника).

Выразим ξ и η через координаты цветности x и y. Для этого подставим в (4.94) E'_R и E'_B из (3.169) и E'_Y из (4.8) и получим

$$\xi = E'_{R-Y}/E'_Y = (E'_R/E'_Y) - 1 = \left(R_{\text{п.и}}^{1/\gamma_{\text{гк}}}/Y'\right) - 1;$$

$$\eta = E'_{B-Y}/E'_Y = (E'_B/E'_Y) - 1 = \left(B_{\text{п.и}}^{1/\gamma_{\text{гк}}}/Y'\right) - 1, \qquad (4.101)$$

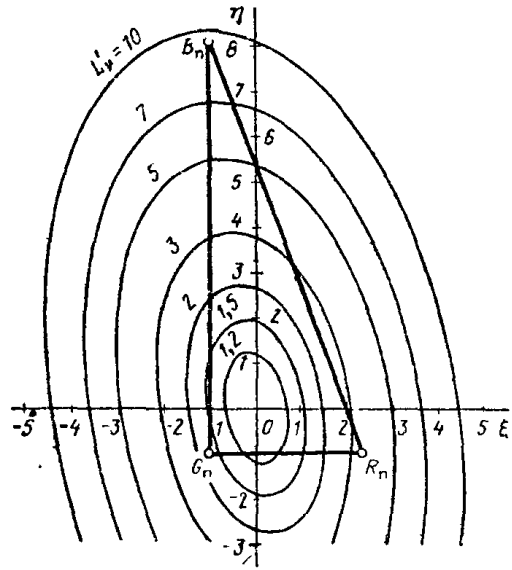


Рис. 4.14. Линии постоянных значений $L'_{\text{н}}$ при $\gamma = 2$ и белом C в качестве равностимульного цвета ($\alpha = 0{,}299$; $\beta = 0{,}587$; $\delta = 0{,}114$)

где Y' — яркость цветного изображения, созданная сигналом E'_Y, а координаты цвета $Ц$ (см. (П.48) и (П.47)) в системе $R_пG_пB_п$ основных цветов NTSC соответственно:

$$R_{п.и} = Y\,[(1{,}910X/Y) - 0{,}532 - 0{,}288\,(Z/Y)]; \tag{4.101}$$

$$B_{п.и} = Y\,[(0{,}058X/Y) - 0{,}118 + 0{,}898\,(Z/Y)], \tag{4.102}$$

$$\text{но } X/Y = x/y;\ Z/Y = z/y = (1 - x - y)/y. \tag{4.103}$$

Подставив (4.103) в (4.102), получим

$$\begin{aligned} R_{п.и} &= Y\,[(1{,}910x/y) - 0{,}532 - 0{,}288\,(1 - x - y)/y] \\ &= (Y/y)\,(2{,}198x - 0{,}244y - 0{,}288); \\ B_{п.и} &= Y\,[(0{,}058x/y) - 0{,}118 + 0{,}898\,(1 - x - y)/y] = \\ &= (Y/y)\,(-0{,}840x - 1{,}016y + 0{,}898). \end{aligned} \tag{4.104}$$

Подставив (4.104) в (4.101), имеем

$$\begin{aligned} \xi &= [(Y/y)\,(2{,}198x - 0{,}244y - 0{,}288)]^{1/\gamma_{гк}}\,(1/Y') - 1; \\ \eta &= [(Y/y)\,(-0{,}840x - 1{,}016y + 0{,}898)^{1/\gamma_{гк}}\,(1/Y') - 1. \end{aligned} \tag{4.105}$$

Обозначим $L_{иY}$ — яркость изображения на экране черно-белого или цветного телевизора, созданная сигналом яркости E'_Y из (4.7); обозначим $L_ц$ — яркость на экранах этих же телевизоров при приеме сигнала яркости $E_Y^{1/\gamma_{гк}}$ из (4.5). Из (3.195) имеем $L_{иY} = S_1\,(E'_Y)^{\gamma_к}$ и $L_ц = S_1\,(E_Y^{1/\gamma_{гк}})^{\gamma_к} = S_1 E_Y$ при $\gamma_к = \gamma_{гк}$. Из (4.8) и (4.9) имеем $E'_Y = Y'/a^{1/\gamma_{гк}}$; $E_Y = Y/a$. Отсюда при $\gamma_{гк} = \gamma_к$ получим $L_{иY} = S_1 \times (Y')^{\gamma_к}/a$; $L_п = S_1 Y/a$. Обозначим

$$K_L = L_{иY}/L_п = [S_1\,(Y')^{\gamma_к}/a]/(S_1\,Y/a) = (Y')^{\gamma_к}/Y. \tag{4.106}$$

Коэффициент K_L можно назвать *коэффициентом верности яркости* изображения в приемниках черно-белого и цветного телевидения при приеме сигнала яркости E'_Y. Подставив (4.106) в (4.105), получим

$$\begin{aligned} \xi &= [(1/(yK_L))\,(2{,}198x - 0{,}244y - 0{,}288)]^{1/\gamma_{гк}} - 1; \\ \eta &= [(1/(yK_l))\,(-0{,}840x - 1{,}016y - 0{,}898)]^{1/\gamma_{гк}} - 1. \end{aligned} \tag{4.107}$$

Из (4.8) имеем $Y' = \alpha R_{п.и}^{1/\gamma_{гк}} - \beta G_{п.и}^{1/\gamma_{гк}} + \delta B_{п.и}^{1/\gamma_{гк}}$; из (3.80) имеем $Y = \alpha R_{п.и} + \beta G_{п.и} + \delta B_{п.и}$. Подставив эти выражения в (4.96), получим

$$K_L = \frac{(Y')^{\gamma_к}}{Y} = \frac{\alpha R_{п.и}^{1/\gamma_{гк}} + \beta G_{п.и}^{1/\gamma_{гк}} + \delta \beta_{п.и}^{1/\gamma_{гк}}}{\alpha R_{п.и} + \beta G_{п.и} + \delta B_{п.и}}. \tag{4.108}$$

Если разделить числитель и знаменатель (4.108) на $m_Ц$ (цвета $Ц$ в системе $R_П G_П B_П$), получим при $\gamma_к = \gamma_{гк}$

$$K_L = \left(\alpha r_{п.и}^{1/\gamma_{гк}} + \beta g_{п.и}^{1/\gamma_{гк}} + \delta b_{п.н}^{1/\gamma_{гк}}\right) / (\alpha r_{п.и} + \beta g_{п.и} + \delta b_{п.и}). \qquad (4.109)$$

Для треугольника NTSC (см. табл. 3.4) значения $r_{п.и}$, $g_{п.и}$, $b_{п.и}$ находим из (3.22) для данных значений x и y. Если разделить числитель и знаменатель (4.108) на Y из (3.80), при $\gamma_к = \gamma_{гк}$ получим

$$K_L = \frac{\alpha (R_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}} + \beta (G_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}} + \delta (B_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}}}{\alpha (R_{п.и}/Y) + \beta (G_{п.и}/Y) + \delta (B_{п.и}/Y)}. \qquad (4.110)$$

Для треугольника NTSC из табл. 3.4 значения миожителей при α, β, δ в этой формуле находим из рис. 3.32; 3.33; 3.34; 3.35 при заданных значениях x и y и далее находим для них K_L из (4.110), или же значение Q и по нему K_L:

$$Q = Y'/Y^{1/\gamma_{гк}} = \alpha (R_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}} + \beta (G_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}} + \delta (B_{п.и}/Y)^{1/\gamma_{гк}};$$

$$K_L = Q^{\gamma_к} \qquad (4.111)$$

при заданном значении $\gamma_{гк} = \gamma_к$.

Из (4.107) находим ξ и η для этих величин x, y, K_L. Далее, не меняя значения x, задаемся другими значениями y, находим K_L, ξ, η для них и т. д. Повторяем подобные расчеты для других значений x. Можно $(R_{п.и}/Y)$, $(G_{п.и}/Y)$, $(B_{п.и}/Y)$ найти из (3.155) и (3.165), подставляя в них значения f_1, f_2 и p, q с индексами 1 ... 3 из Приложения, и далее определить Q и затем K_L. На рис. 4.15 построены линии постоянных значений x и y путем соединения плавной кривой точек с постоянным значением x, а также точек с постоянным значением y. Из этого рисун-

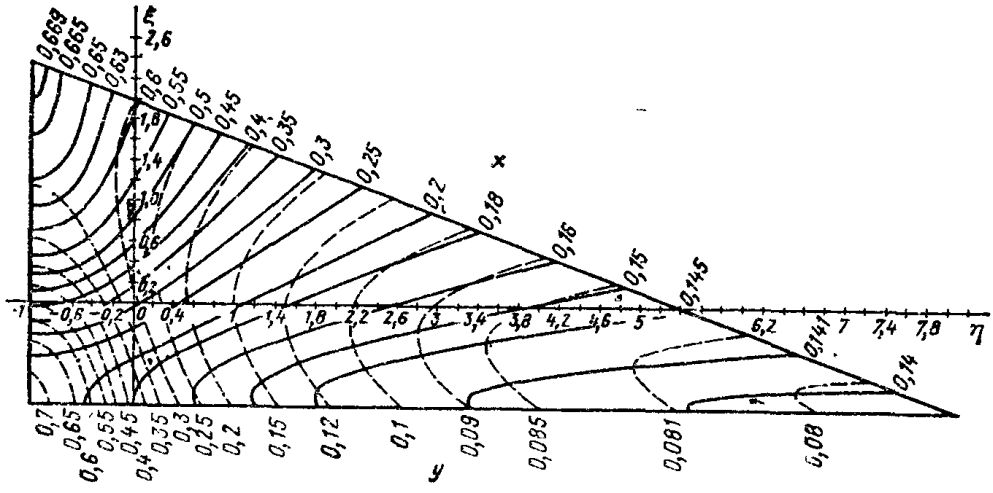


Рис. 4.15. Линии постоянных значений x и y в системе координат ξ и η

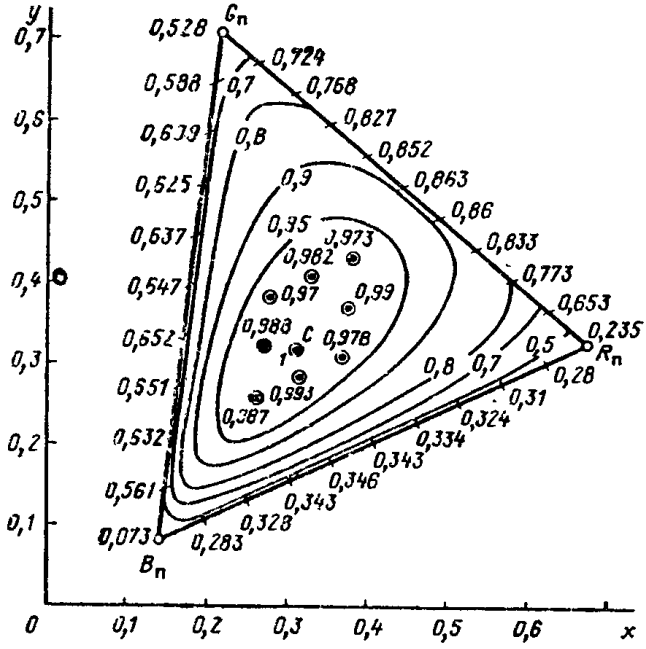


Рис. 4.16. Линий постоянных значений коэффициента K_L при передаче сигналов E'_Y, E'_{R-Y}, E'_{B-Y}, $\gamma = 2{,}2$ при белом C в качестве равностимульного цвета ($\alpha = 0{,}299$; $\beta = 0{,}587$; $\delta = 0{,}114$)

ка следует, что вблизи равностимульного в системе $R_пG_пB_п$ цвета (белое C), т. е. вблизи точки $\xi = 0$, $\eta = 0$, линии $x = \text{const}$ и $y = \text{const}$ расположены ближе друг к другу, чем на насыщенных цветах, что означает более сильное влияние на цветность изменений сигналов цветности ξ и η вблизи этого цвета, чем на насыщенных цветах, где эти сигналы влияют главным образом на яркость цвета, а не на его цветность (с ростом $\gamma_к$ этот эффект усиливается; при $\gamma_к = 1$ линии $x = \text{const}$ и $y = \text{const}$ будут прямыми с равномерным шагом). На равностимульном в системе $R_пG_пB_п$ цвете $R_{п.и} = G_{п.и} = B_{п.и}$, и из (4.8) и (4.9) имеем $Y' = R_{п.и}^{1/\gamma_{гк}}$; $Y^{1/\gamma_{гк}} = R_{п.и}^{1/\gamma_{гк}}$, т. е. $Y' = Y^{1/\gamma_{гк}}$, и из (4.111) получим $Q = 1$ и $K_L = 1$.

На рис. 4.16 вышеуказанным методом построены линии постоянных значений K_L. Из него следует, что на белом C при треугольнике NTSC (см. табл. 3.4) $K_L = 1$, а в других точках $K_L < 1$; минимальное значение K_L около точки $B_п$. С ростом насыщенности цвета нарушение принципа постоянной яркости увеличивается ($K_L < 1$). Таким образом, величина K_L является мерой отклонения от принципа постоянной яркости при приеме сигнала яркости E'_Y.

4.3. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕДАЮЩЕЙ КАМЕРЫ

Техника цветного телевидения в настоящее время достигла высокого уровня и рассматривается в многочисленных публикациях [56—66]. Одним из важнейших вопросов является определение оптимальных спектральных характеристик передающей камеры.

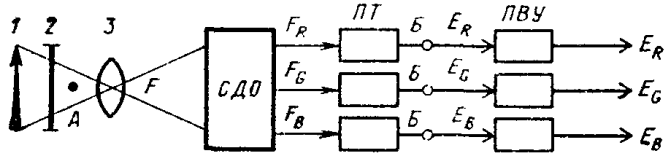


Рис. 4.17. Схема камеры на трех передающих трубках ПТ (*1* — передаваемая сцена, *2* — приводной светофильтр, *3* — съемочный объектив). Источник освещения сцены создает излучение $P_{\lambda u}$

Рассмотрим идеальные и реальные спектральные характеристики передающей камеры. Под передающей телевизионной камерой будем понимать устройство, в котором световой поток от передаваемой сцены преобразуется в электрические видеосигналы. В настоящее время известны два типа камеры: 1) с применением преобразователей света в сигнал с накоплением электрических зарядов, созданных оптическим изображением передаваемой сцены на светочувствительной поверхности преобразователя и считываемых путем их поочередной коммутации на вход предварительного видеоусилителя (ПВУ) в виде импульсов тока (напряжения) сигнала. Такими преобразователями являются передающие электронно-лучевые трубки (суперортиконы, различные виды видиконов) или твердотельные приборы (например, с зарядовой связью)); б) с применением бегущего светового луча, описывающего растр на передаваемой сцене; отраженный от сцены (или прошедший через киноленту или диапозитив) свет с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) превращается в видеосигнал на входе ПВУ.

В обоих типах камеры световой луч проходит через светоделительную оптическую систему (СДО), в которой разделяется на три луча — красный (R), зеленый (G) и синий (B). На рис. 4.17 длина оптического пути от точки *A* до светочувствительной поверхности ПТ должна быть одинаковой для трех каналов R, G, B. На рис. 4.18 показана схема камеры с бегущим лучом и тремя ФЭУ для передачи изображений диапозитивов методом бегущего луча. Бегущий световой луч создается кинескопом *1*, называемым *просвечивающим*, на плоском экране которого создается светящийся растр одного цвета (монохромный) с постоянной яркостью во всех его точках (растр представляет собой светящееся

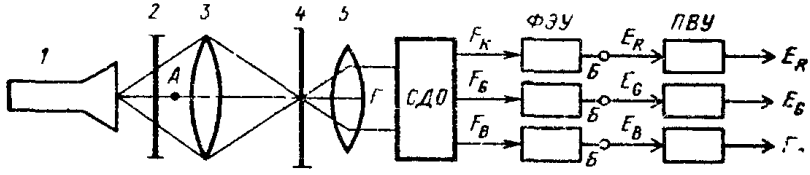


Рис. 4.18. Схема диапозитивной камеры с бегущим лучом (*1* — просвечивающий кинескоп, *2* — приводной светофильтр, *3* — объектив, *4* — диапозитив (кинолента), *5* — конденсор). Кинескоп *1* создает излучение $P_{\lambda u}$

пятно, бегущее по всем строкам по очереди). Через приводной светофильтр *2* изображение бегущего светового пятна (растра) создается объективом *3* на диапозитиве *4*. Световые лучи, прошедшие через диапозитив, имеют в каждой его точке яркость, зависящую от оптической плотности D точки. Эти лучи собираются конденсором *5* и проходят на СДО, с выхода которой три окрашенных световых потока F_R, F_G, F_B подаются на светочувствительные слои ФЭУ; на выходах ФЭУ образуются видеосигналы E_R, E_G, E_B.

Принципиальная схема СДО для камер (рис. 4.17 и 4.16) показана на рис. 4.19. Здесь $З_1$ и $З_2$ синеотражающее и красноотражающее дихроические зеркала (их спектральные характеристики см. на рис. 2.67 и 2.68). Зеркало *1* — нейтральное (т. е. его спектральное отражение $\rho_\lambda = \text{const}$), *2* — корректирующие светофильтры, *3* — линза Смита (для коррекции кривизны поля в изображении, в камере с ФЭУ — отсутствует). Приводной светофильтр (ПФ) применяется для изменения спектральной плотности $P_{\lambda н}$ источника освещения передаваемой сцены (в студии, диапозитива или киноленты), т. е. для перевода $P_{\lambda н}$ в $P_{\lambda D65}$ (при использовании диапозитивной камеры с бегущим лучом под $P_{\lambda н}$ понимают изучение просвечивающего кинескопа). Для этого светофильтра спектральный коэффициент пропускания

$$\tau_{\lambda пф} P_{\lambda н} = P_{\lambda D65}. \qquad (4.112)$$

При использовании диакамеры (камеры телекино) вместо $P_{\lambda D65}$ может быть рекомендован другой источник освещения, при передаче из студии обычно применяют источники освещения с цветовой температурой 3200 К с непрерывным спектром, у которых спектральная плотность излучения $P_{\lambda н} \approx P_\lambda$ для стандартного источника белого света A (лампа накаливания с вольфрамовой нитью см. § 2.19), 2856К. Принято считать, что при наблюдении цветного изображения на экране телевизора (в неосвещенной комнате) цветовое впечатление у зрителя лучше, если передаваемую сцену освещать дневным светом (белое C или D_{65}). Кинофильмы на пленке шириной 35 мм рассчитаны на при-

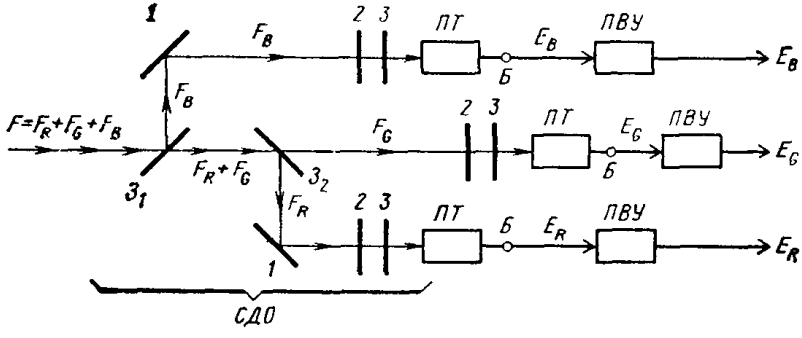


Рис. 4.19. Схема СДО в трехтрубочной камере:
$З_1$ и $З_2$ — дихроические зеркала, *1* — нейтральное зеркало, *2* — корректирующий светофильтр, *3* — линза Смита

менение в кинопроекторе источника света с излучением, близким к излучению источника C (ксеноновая лампа 5600 К), а кинофильмы на пленке шириной 16 мм, рассчитаны на источник света 3200 К (спектральные плотности P_λ для этих источников см. в табл. 2.12). Спектральные характеристики каналов $S_{\lambda R}$, $S_{\lambda G}$, $S_{\lambda B}$ относятся к трем каналам камеры RGB от входа съемочного объектива до выхода каждой передающей трубки (см. рис. 4.17, от *А* до *Б*) или от источника бегущего светового луча до выхода каждого ФЭУ (см. рис. 4.18 от *А* до *Б*). Для правильной цветопередачи эти характеристики должны отвечать условию (3.18), т. е. иметь вид зависимостей удельных координат $\bar{r}_\text{п}$, $\bar{q}_\text{п}$, $\bar{b}_\text{п}$ в системе $R_\text{п}G_\text{п}B_\text{п}$ от длины волны. Эти зависимости можно найти, если в (2.161) или в (2.190) подставить $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ вместо X, Y, Z и $\bar{r}_\text{п}$, $\bar{g}_\text{п}$, $\bar{b}_\text{п}$ вместо $R_\text{п}$, $G_\text{п}$, $B_\text{п}$. (Значения $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ даны в табл. 2.5.) Матрицы $\widetilde{\mathbf{A}}_0$ и $\widetilde{\mathbf{M}}_\text{с}$ отличаются постоянным множителем A' (см. (2.187)), поэтому отношение $\bar{r}_\text{п}:\bar{g}_\text{п}:\bar{b}_\text{п}$ для них сохраняется и, следовательно, координаты цветности при замене $\widetilde{\mathbf{M}}_\text{с}$ на $\widetilde{\mathbf{A}}_0$ не изменяются. Напишем выражение для $\widetilde{\mathbf{M}}_\text{с}$ из (2.161) через координаты основных цветов $R_\text{п}$, $G_\text{п}$, $B_\text{п}$ и эталонного белого цвета $Ц_\text{рс}$ (равностимульный в системе $R_\text{п}G_\text{п}B_\text{п}$ — равносигнальный) по аналогии с (2.184). Для этого заменяем в (2.184) и (2.185) X, Y, Z в левой части на $\bar{r}_\text{п}$, $\bar{g}_\text{п}$, $\bar{b}_\text{п}$ и на $R_\text{п}$, $G_\text{п}$, $B_\text{п}$ в правой части в индексах соответственно и, заменяя R, G, B на $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ и r, q, b на x, y, z соответственно, получим:

$$\bar{r}_\text{п} = [1/(3D_1)]\,[(y_G z_B - y_B z_G)\,\bar{x} + (x_B z_G - x_G z_B)\,\bar{y} + (x_G y_B - x_B y_G)\,\bar{z}];$$

$$\bar{g}_\text{п} = [1/(3D_2)]\,[(y_B z_R - y_R z_B)\,\bar{x} + (x_R z_B - x_B z_R)\,\bar{y} + (x_B y_R - x_R y_B)\,\bar{z}];$$

$$\bar{b}_\text{п} = [1/(3D_3)]\,[(y_R z_G - y_G z_R)\,\bar{x} + (x_G z_R - x_R z_G)\,\bar{y} + (x_R y_G - x_G y_R)\,\bar{z}]; \qquad (4.113)$$

$$D_1 = x_\text{э}(y_G z_B - y_B z_G) + y_\text{э}(x_B z_G - x_G z_B) + z_\text{э}(x_G y_B - x_B y_G);$$

$$D_2 = x_\text{э}(y_B z_R - y_R z_B) + y_\text{э}(x_R z_B - x_B z_R) + z_\text{э}(x_B y_R - x_R y_B);$$

$$D_3 = x_\text{э}(y_R z_G - y_G z_R) + y_\text{э}(x_G z_R - x_R z_G) + z_\text{э}(x_R y_G - x_G y_R). \qquad (4.114)$$

Здесь множители перед $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ в (4.113), включая $[1/(3D_1)]$, $[1/(3D_2)]$, $[1/(3D_3)]$, являются элементами матрицы $\widetilde{\mathbf{M}}_\text{с}$ из (2.161). Выражения в квадратных скобках определяют форму характеристик $\bar{r}_\text{п}$, $\bar{g}_\text{п}$, $\bar{b}_\text{п}$, а множители перед ними необходимы для правильного отношения между характеристиками; $x_\text{э}$, $y_\text{э}$, $z_\text{э}$ — координаты цветности эталонного (равностимульного в системе $R_\text{п}G_\text{п}B_\text{п}$) цвета $Ц_\text{р}$.

Для расчета характеристик (4.113) принято в качестве треугольника основных цветов применять треугольник ЕС (см. табл. 3.4), и в ка-

честве $Ц_р$ — белое D_{65} (стандарт СССР). Для этого случая элементы матрицы $\tilde{\mathbf{M}}_c$ рассчитаны (см. Приложение):

$$\bar{r}_п = 3{,}09373\bar{x} - 1{,}40720\ \bar{y} - 0{,}48054\bar{z};$$
$$\bar{g}_п = -0{,}98292\bar{x} + 1{,}90243\bar{y} + 0{,}04214\bar{z};$$
$$\bar{b}_п = 0{,}06882\bar{x} - 0{,}23202\bar{y} + 1{,}08416\bar{z}. \qquad (4.115)$$

Можно использовать элементы матрицы $\tilde{\mathbf{A}}_0$ (см. (П.47)). Тогда получим

$$\bar{r}_п = 3{,}05351\bar{x} - 1{,}38891\bar{y} - 0{,}47429\bar{z};$$
$$\bar{g}_п = -0{,}97014\bar{x} + 1{,}87770\bar{y} + 0{,}04159\bar{z};$$
$$b_п = 0{,}06792\bar{x} - 0{,}22901\bar{y} + 1{,}07007\bar{z}. \qquad (4.116)$$

Спектральные характеристики (4.115) или (4.116) называются *идеальными* — они обеспечивают неискаженное воспроизведение всех цветов, представленных на диаграмме цветностей точками внутри треугольника основных цветов приемника. Цветности, представленные точками вне этого треугольника, воспроизводятся искаженно и переходят в цветности, представленные некоторыми точками внутри этого треугольника или на его сторонах (приемник не может создавать цвета, представленные точками вне этого треугольника.)

Значения $\bar{r}_п$, $\bar{g}_п$, $\bar{b}_п$ из (4.115) даны в табл. 4.3. В соответствии с данными табл. 4.3 на рис. 4.20 построены идеальные спектральные характеристики. Видно, что наряду с главными (большими положительными) ветвями они имеют вспомогательные отрицательные и малые положительные ветви. Наличие отрицательных ветвей объясняется тем, что треугольник основных цветов приемника расположен на диаграмме цветностей внутри спектрального локуса и может обеспечить только колориметрическое согласование со спектральными цветами. Эти ветви, однако, необходимы для неискаженного воспроизведения цветностей, представленных точками внутри треугольника $R_пG_пB_п$ на диаграмме цветностей, особенно для точного воспроизведения насыщенных цветностей, расположенных вблизи от его сторон. Отсутствие этих ветвей приводит к искажению цветового тона и снижению насыщенности большинства воспроизводимых цветов.

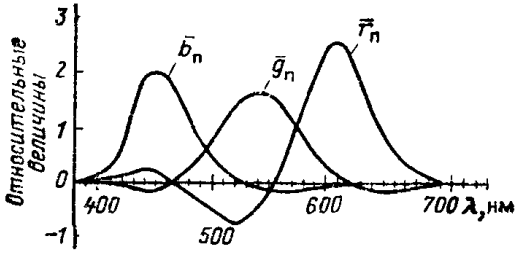


Рис. 4.20. Идеальные спектральные характеристики передающей камеры для треугольника основных цветов приемника ЕС и белого цвета D_{65} в качестве $Ц_р$ (стандарт СССР)

Обычно на практике оптическая система камеры (включая СДО) и передающие труб-

Таблица 4.3

λ, нм	$\bar{r}_п$	$\bar{g}_п$	$\bar{b}_п$	λ, нм	$\bar{r}_п$	$\bar{g}_п$	$\bar{b}_п$
380	0,001	—0,001	0,007	590	2,109	0,431	—0,104
390	0,003	—0,003	0,022	600	2,398	0,156	—0,072
400	0,011	—0,010	0,075	610	2,394	—0,029	—0,047
410	0,033	—0,032	0,228	620	2,107	—0,115	—0,029
420	0,1	—0,097	0,708	630	1,615	—0,127	—0,017
430	0,196	—0,199	1,519	640	1,139	—0,107	—0,010
440	0,206	—0,225	1,913	650	0,727	—0,075	—0,005
450	0,135	—0,183	1,936	660	0,424	—0,046	—0,003
460	0,013	—0,101	1,816	670	0,225	—0,025	—0,001
470	—0,142	0,035	1,388	680	0,121	—0,014	—0,001
480	—0,291	0,205	0,856	690	0,059	—0,007	0,000
490	—0,417	0,384	0,458	700	0,029	—0,003	0,000
500	—0,570	0,621	0,220	710	0,015	—0,002	0,000
510	—0,755	0,954	0,055	720	0,008	—0,001	0,000
520	—0,841	1,292	—0,076	730	0,004	0,000	0,000
530	—0,721	1,479	—0,143	740	0,002	0,000	0,000
540	—0,454	1,530	—0,179	750	0,001	0,000	0,000
550	—0,064	1,467	—0,192	760	0,000	0,000	0,000
560	0,437	1,309	—0,186	770	0,000	0,000	0,000
570	1,017	1,062	—0,166	780	0,000	0,000	0,000
580	1,610	0,755	—0,137				

ки (или ФЭУ) не создают отрицательных ветвей спектральных характеристик. Их спектральные характеристики — это главные ветви идеальных характеристик или близки к ним. Обозначим эти характеристики $\bar{r}'_п$, $\bar{g}'_п$, $\bar{b}'_п$; при них искажения цветопередачи обычно не намного превышают допустимые значения. Для снижения этих искажений применяют цветокорректирующие матричные схемы (матрицы). Эти матрицы создают необходимые отрицательные ветви и приближают результирующие характеристики к идеальным. На входы матрицы должны поступать линейные сигналы.

Реальные спектральные характеристики каналов камеры S_λ определяются спектральными коэффициентами отражения ρ_λ и пропускания τ_λ звеньев оптической системы и спектральной характеристикой передающей трубки $S_{\lambda п.т}$, входящих в эти каналы. Например, для канала R имеем

$$S_{\lambda R} = (\rho_{1\lambda}\rho_{2\lambda}\rho_{3\lambda}\ldots\rho_{n\lambda})(\tau_{1\lambda}\tau_{2\lambda}\tau_{3\lambda}\ldots\tau_{n\lambda})\tau_{\lambda к.ф R}S_{\lambda п.т R}, \qquad (4.117)$$

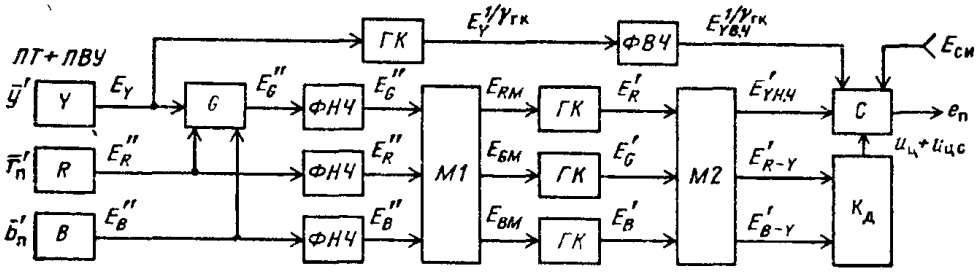


Рис. 4.21. Структурная схема камеры типа YRB

где $\rho_{1\lambda}$, $\rho_{2\lambda}$, .., $\rho_{n\lambda}$ — спектральные отражения звеньев 1, 2, 3, ..., n оптического тракта (см. рис. 4.11 ... 4.19, тракт A — $Б$), от которых свет отражается; $\tau_{1\lambda}$, $\tau_{2\lambda}$, $\tau_{3\lambda}$, ..., $\tau_{n\lambda}$ — спектральные коэффициенты пропускания звеньев 1, 2, 3, ..., n оптического тракта A — $Б$, через которые свет проходит; $\tau_{\lambda к.фR}$ — спектральное пропускание корректирующего светофильтра (КФ); $S_{\lambda п.тR}$ — спектральная характеристика ПТ канала R. Обычно ρ_λ, τ_λ, $S_{\lambda п.т}$ заданы и получить необходимые спектральные характеристики, например

$$S_{\lambda R} = \bar{r}'_п;\ S_{\lambda G} = \bar{g}'_п;\ S_{\lambda B} = \bar{b}'_п, \tag{4.118}$$

можно с помощью КФ, определяя его характеристику $\tau_{\lambda к\,фR}$ для канала R из (4.117) и (4.118). Для уменьшения потерь света целесообразно объединить приводной светофильтр ПФ с корректирующим светофильтром и заменить эту пару фильтров в каждом канале камеры универсальным фильтром УФ с характеристикой $\tau_{\lambda у.ф} = \tau_{\lambda п\cdot ф}\,\tau_{\lambda к\cdot ф}$, помещая такие фильтры в удобном месте оптического тракта каждого канала камеры и делая их сменными для работы при различных источниках освещения. В трехтрубочных камерах типа RGB оптическая система вместе с передающими трубками имеет ширину спектральных характеристик $\bar{r}'_п$, $\bar{g}'_п$, $\bar{b}'_п$, рассчитанных по данным табл. 4.3 такую, чтобы компенсировать отсутствие отрицательных ветвей, что снижает чувствительность камеры (ухудшается отношение сигнал/шум).

В трехтрубочных камерах типа YRB (рис. 4.21) спектральные характеристики имеют вид $\bar{r}'_п$, $\bar{b}'_п$ и $\bar{y}'_п$, где $\bar{y}'$ v_λ или у́же, чем v_λ (значения v_λ даны в табл. 1.2), но шире, чем $\bar{g}'_п$ ($\bar{y}'$ — характеристика канала Y). Схема камеры типа YRB дана на рис. 4.21, где линейный сигнал E_Y проходит через гамма-корректор и становится сигналом $E_Y^{1/\gamma_{гк}}$. Через фильтр высоких частот (ФВЧ) проходит спектр этого сигнала в полосе частот 1 ... 6 МГц и образует на его выходе сигнал $E_{Y_{в.ч}}^{1/\gamma_{гк}}$, который вместе с синхроимпульсами $E_{сн}$ подается на слагатель C. С выхода камеры линейные сигналы E'_Y, E''_R, E''_B подаются на G-матрицу, на выходе которой рекомендуется создавать сигнал

$$E''_G = 1{,}71E_Y - 0{,}52E''_R - 0{,}19E''_B. \tag{4.119}$$

Действие этой матрицы эквивалентно преобразованию характеристики $\bar{y}'$ в $g'_{\text{п}}$:

$$\bar{g}'_{\text{п}} = 1{,}71\bar{y}' - 0{,}52\bar{r}'_{\text{п}} - 0{,}19\bar{b}'_{\text{п}}. \qquad (4.120)$$

Сигналы E''_R, E''_G, E''_B через фильтры нижних частот (ФНЧ) с полосой пропускания 1,3 ... 1,5 МГц проходят на цветокорректирующую матрицу М 1 (состоящую из трех субматриц), преобразующую характеристики $\bar{r}'_{\text{п}}$, $\bar{g}'_{\text{п}}$, $\bar{b}'_{\text{п}}$. В характеристики $\bar{r}''_{\text{п}}$, $\bar{g}''_{\text{п}}$, $\bar{b}''_{\text{п}}$, близкие к идеальным $\bar{r}_{\text{п}}$, $\bar{g}_{\text{п}}$, $\bar{b}_{\text{п}}$. Это преобразование рекомендуется выполнять по следующим формулам:

$$E_{RM} = 1{,}455E''_R - 0{,}466E''_G + 0{,}011E''_B;$$
$$E_{GM} = -0{,}166E''_R + 1{,}272E''_G - 0{,}105E''_B;$$
$$E_{BM} = -0{,}001E''_R - 0{,}167E''_G + 1{,}168E''_B. \qquad (4.121)$$

Эти узкополосные сигналы поступают на гамма-корректоры, с выхода которых сигналы E'_R, E'_G, E'_B поступают на матрицу М2, в которой создаются сигналы $E'_{Y\text{н.ч}}$, E'_{R-Y}, E'_{B-Y}. Сигнал $E'_{Y\text{н.ч}}$ (это низкочастотная, до 1 МГц, часть сигнала яркости E'_Y) складывается в слагателе C с $E'^{1/\gamma_{\text{гк}}}_{Y\text{в.ч}}$ и образует сигнал яркости $E'_Y = E'_{Y\text{н.ч}} + E'^{1/\gamma_{\text{гк}}}_{Y\text{в.ч}}$, а цветоразностные сигналы модулируют в кодере $K_{\text{д}}$ поднесущую, образуя на его выходе сигнал цветности на поднесущей $u_{\text{ц}}$; здесь же создается сигнал цветовой синхронизации на поднесущей $u_{\text{ц.с}}$. Эти два сигнала ($u_{\text{ц}} + u_{\text{ц.с}}$) подаются на C, на выходе которого образуется полный видеосигнал цветного телевидения $e_{\text{п}}$ из (4.2).

В трехтрубочных камерах типа WRB (рис. 4.22), спектральные характеристики оптики вместе с передающими трубками имеют вид $\bar{r}'_{\text{п}}$, $\bar{b}'_{\text{п}}$, ω_λ, где ω_λ — характеристика канала W; эта характеристика шире (рис. 4.23, *а*) чем правый склон кривой $\bar{g}'_{\text{п}}$, их левые склоны совпадают или шире правого и левого склонов кривой $g'_{\text{п}}$.

Это способствует повышению чувствительности камеры. По схеме камеры типа WRB с каналом обработки видеосигналов рис. 4.22 три передающие трубки ПТ вместе с предварительными видеоусилителями вырабатывают сигналы E_W, E''_R, E''_B, подаваемые на цветокорректирую-

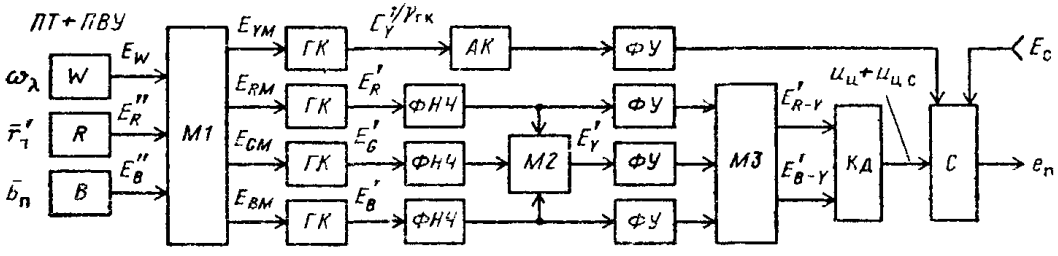


Рис. 4.22. Структурная схема камеры типа WRB

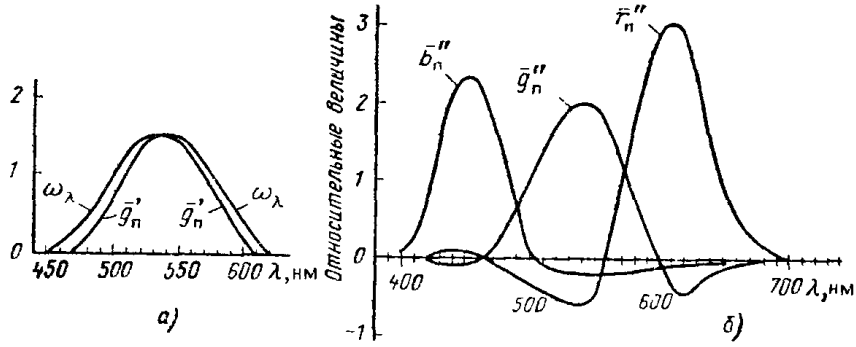


Рис. 4.23. Скорректированные спектральные характеристики камеры типа WRB, характеристики $g_п'$ и ω_λ

щую матрицу М1 (состоит из трех субматриц). Рекомендуется на ее выходе иметь следующие сигналы:

$$E_{YM} = 0{,}9E_W + 0{,}1E_R''; \quad E_{RM} = 1{,}3E_R'' - 0{,}35E_W + 0{,}05E_B';$$
$$E_{GM} = -0{,}2E_R'' + 1{,}25E_W - 0{,}05E_B'';$$
$$E_{BM} = -0{,}05E_R'' - 0{,}15E_W + 1{,}2E_B''. \qquad (4.122)$$

Сигналы на выходе гамма-корректора:

$$E_Y^{1/\gamma_{гк}} = E_{YM}^{1/\gamma_{гк}}; \quad E_R' = E_{RM}^{1/\gamma_{гк}}; \quad E_G' = E_{GM}^{1/\gamma_{гк}}; \quad E_B' = E_{BM}^{1/\gamma_{гк}}. \qquad (4.123)$$

Сигнал $E_Y^{1/\gamma_{гк}}$ проходит через апертурный корректор АК на формирующий усилитель ФУ и с него на слагатель С, где вместе с синхроимпульсами $E_{с.и}$ добавляется к полному сигналу цветности ($u_ц + u_{ц.с}$) на поднесущей. Сигналы E_R', E_G', E_B' через фильтры нижних частот, ограничивающие их спектр до 1,3 ... 1,5 МГц, поступают на ФУ, причем в матрице М2 формируется узкополосный сигнал яркости (4.64):

$$E_Y' = 0{,}30E_R' + 0{,}59E_G' + 0{,}11E_B'. \qquad (4.124)$$

В матрице М3 формируются цветоразностные сигналы E_{R-Y}' и E_{B-Y}'. В кодере Кд эти сигналы модулируют поднесущую, образуя на его выходе сигнал цветности на поднесущей $u_ц$. Здесь же создается на поднесущей сигнал цветовой синхронизации $u_{ц.с}$. Эти два сигнала подаются на слагатель С, на выходе которого образуется полный видеосигнал цветного телевидения $e_п$ из (4.2).

Отметим, что в (4.119) одно слагаемое гораздо больше двух других; поэтому на выходе М1 отношение сигнал-шум снижается незначительно. Это является одним из преимуществ камеры типа WRB. Кроме того, в такой камере меньше влияют ошибки совмещения трех растров на качество изображения (черно-белое и цветное), так как сигнал E_{YM} создается, главным образом, сигналом E_W от одной передающей трубки.

Откорректированные спектральные характеристики камеры типа WRB вместе с цветокорректирующей матрицей определяются в соответствии с (4.122):

$$\bar{r}''_{\text{п}} = 1{,}3\bar{r}'_{\text{п}} - 0{,}35\omega_\lambda + 0{,}05\bar{b}'_{\text{п}};\ \bar{g}''_{\text{п}} = -0{,}2\bar{r}'_{\text{п}} + 1{,}25\omega_\lambda - 0{,}05\bar{b}'_{\text{п}};$$

$$\bar{b}''_{\text{п}} = -0{,}05\bar{r}'_{\text{п}} - 0{,}15\omega_\lambda + 1{,}2\bar{b}'_{\text{п}}. \qquad (4.125)$$

Значения $\bar{r}'_{\text{п}}$ и $\bar{b}'_{\text{п}}$ (главные ветви идеальных характеристик) были даны в табл. 4.3. Один вариант характеристики ω_λ показан на рис. 4.23, *а*, для которого сделан расчет характеристик по (4.125). Они даны на рис. 4.23, *б*. Из сравнения рис. 4.23, *б* с рис. 4.20 видно, что они приближаются к идеальным. Влияние выбора треугольника основных цветов приемника на форму идеальных спектральных характеристик камеры, а также определение размаха сигнала на выходе камеры рассмотрено в [47, с. 191—214].

4.4. ЦВЕТОКОРРЕКЦИЯ С ПОМОЩЬЮ МАТРИЧНЫХ СХЕМ

Метод цветокоррекции. Построение цветокорректирующих матричных схем рассмотрено в [58, 59]. Цветокорректирующая матрица для коррекции трех видеосигналов состоит из трех субматриц СМ (на рис. 4.24 показана схема их включения.) Видеосигналы E''_R, E''_G, E''_B с выходов ПВУ подаются на три СМ. На выходах СМ в точках A создаются откорректированные реальные сигналы E_{RM}, E_{GM}, E_{BM}, несколько отличающиеся от идеальных (не содержащих искажения) сигналов $E_{R\text{о}}$, $E_{G\text{о}}$, $E_{B\text{о}}$. Назначение цветокорректирующих СМ — свести к минимуму ошибки в реальных сигналах, т. е. минимизировать разности $E_{R\text{о}} - E_{RM}$; $E_{G\text{о}} - E_{GM}$; $E_{B\text{о}} - E_{BM}$ для большинства передаваемых цветов [66]. Для этого надо правильно определить коэффициенты матрицирования, т. е. коэффициенты в (4.121) или (4.122), если они неизвестны. Ниже будет рассмотрена методика такого расчета.

На рис. 4.25 представлена схема субматрицы канала R (для каналов G и и B — схемы аналогичные). Полученный после ГК и видеоусилители ВУ сигнал $E'_{R\text{к}}$ подается на канал R кинескопа (кодер и декодер не

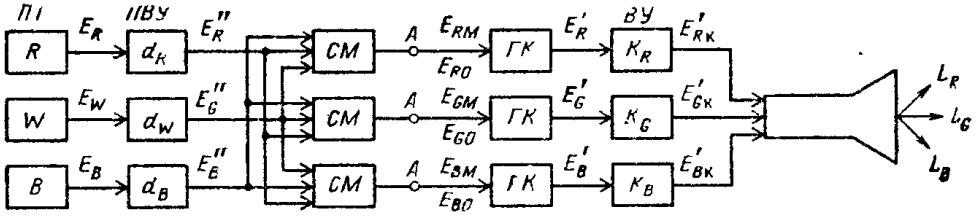


Рис. 4.24. Структурная схема включения в камере типа WRB цветокорректирующей матрицы, состоящей из трех субматриц

показаны, так как они выполняют взаимообратные операции и не должны вносить искажений в видеосигнал). Субматрица состоит из четырех резисторов R1—R4. Реальный сигнал на выходе СМ

$$E_{RM} = aE''_R + bE''_G + cE''_B, \tag{4.126}$$

где a, b, c — постоянные коэффициенты (коэффициенты матрицирования) для канала R. Из схемы рис. 4.25 имеем $aE''_R = E''_R R_4//(R_1 + R_4)$, откуда находим

$$R_1 = R_4(1-a)/a;\ R_2 = R_4(1-b)/b;\ R_3 = R_4(1-c)/c. \tag{4.127}$$

Поставим условие: опорный цвет D_{65} должен воспроизводиться на экране кинескопа приемника без искажений как при использовании матрицы, так и без нее. Обозначим сигналы, соответствующие D_{65}, индексом D. Тогда в точке A схемы должно быть для цвета D_{65}, если он равносигнален на входе СМ и ГК:

$$E_{RMD} = E''_{RD} = E''_{GD} = E''_{BD} = E_{OD}, \tag{4.128}$$

где E_{OD} — заданное значение (например, 1 В).

Подставив (4.128) в (4.126), получим $E_{RMD} = aE_{OD} + bE_{OD} + cE_{OD} = (a + b + c)E_{OD}$. Отсюда следует

$$a + b + c = 1, \tag{4.129}$$

т. е. (4.128) выполняется, если выполнено (4.129). Подставив c из (4.129) в (4.126), получим

$$E_{RM} = a(E''_R - E''_B) + b(E''_G - E''_B) + E''_B. \tag{4.130}$$

Для цвета $Ц_i$ ошибка в сигнале E_{RM} равна $E_{Ro} - E_{RM}$. Из (4.130) имеем (i — номер *тест-цвета*)

$$E_{Ro} - E_{RM} = E_{Ro} - a(E''_R - E''_B) - b(E''_G - E''_B) - E''_B =$$
$$= n_i - av_i - bp_i, \tag{4.131}$$

где

$$n_i = E_{Ro} - E''_B;\ v_i = E''_R - E''_B;\ p_i = E''_G - E''_B. \tag{4.132}$$

Чтобы матрица одновременно выполняла и функции приводного фильтра, необходимо, чтобы (4.128) выполнялось для излучения реального освещения передаваемой сцены, что и будет означать приведение этого источника к излучению белого цвета D_{65} (в этом случае реальный источник освещения будет создавать в приемнике белый цвет D_{65}, так как тракт правее точки A (рис. 4.24) настроен так, что любой равносигнальный цвет воспроизводится в виде белого D_{65}).

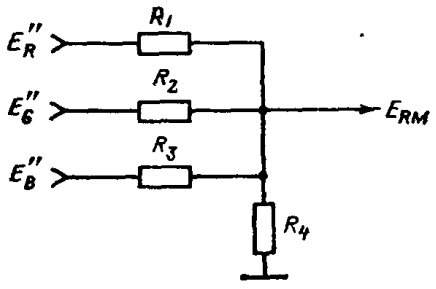


Рис. 4.25. Схема субматрицы канала R камеры

Примеиим набор из m тест-цветов с номерами 1, 2, 3, ..., m. Размахи

видеосигналов в точках A трех каналов, необходимые для неискаженного воспроизведения данного тест-цвета на экране кинескопа, обозначим, как и ранее, E_{Ro}, E_{Go}, E_{Bo} (каждому тест-цвету соответствует свое значение E_{Ro}, т. е. свое значение коэффициентов a, b, c в (4. 126); аналогично — E_{Go} и E_{Bo}, поэтому при переходе от одного цвета к другому следует изменять коэффициенты a, b, c в (4.126), что на современном уровне техники не осуществляется). Эти сигналы отличаются от реальных сигналов E_{RM}, E_{GM}, E_{BM}, так как коэффициенты a, b, c в (4.126) определяются сопротивлениями $R_1 \ldots R_4$ (рис. 4.25), которые не изменяются при переходе от одного цвета к другому. Поэтому коэффициенты a, b, c в (4.126) выбирают статистически, т. е. как оптимальные для набора тест-цветов в целом, а не для отдельных тест-цветов (при таком методе значения этих коэффициентов могут сильно отличаться от требуемых для ряда отдельных цветов, что снижает качество цветокоррекции). Для статистического приближения сигналов E_{RM}, E_{GM}, E_{BM} к сигналам E_{Ro}, E_{Go}, E_{Bo} применяется метод наименьших квадратов (МНК), т. е. находят минимум суммы Q квадратов ошибок:

$$Q = \sum_1^m (E_{Ro} - E_{RM})^2 = \sum_1^m (n_i - av_i - bp_i)^2 = \min, \qquad (4.133)$$

где n_i, v_i, p_i — из (4.132). Для этого находим dQ/da и приравниваем эту частную призводную нулю:

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = -2 \sum_1^m (n_i - av_i - bp_i)\, v_i = 0, \text{ отсюда}$$

$$\sum_1^m (n_i v_i - av_i^2 - ap_i v_i) = 0, \text{ т. е.}$$

$$\sum_1^m n_i v_i - a \sum_1^m v_i^2 - b \sum_1^m p_i v_i = 0, \text{ или}$$

$$S_1 - aS_2 - bS_3 = 0, \qquad (4.134)$$

где $S_1 = \sum_1^m n_i v_i$; $S_2 = \sum_1^m v_i^2$; $S_3 = \sum_1^m p_i v_i$. (4.135)

Аналогично получим

$$\frac{\partial Q}{\partial b} = -2 \sum_1^m (n_i - av_i - bp_i)\, p_i = 0; \text{ отсюда}$$

$$\sum_1^m (n_i p_i - av_i p_i - bp_i^2) = 0, \text{ или}$$

$$S_4 - aS_3 - bS_5 = 0, \qquad (4.136)$$

где $S_4 = \sum_1^m n_i p_i$; $S_5 = \sum_1^m p_i^2$. (4.137)

Решая (4.134) и (4.136) относительно a и b, получим

$$a=(S_3 S_4-S_1 S_5)/A;\quad b=(S_3 S_1-S_2 S_4)/A;\quad A=S_3^2-S_2 S_5. \quad (4.138)$$

Коэффициент c находим из (4.129).

Таким же образом находим коэффициенты a, b, c для каналов G и B и получаем три уравнения для сигналов на выходе субматриц:

$$E_{RM}=a_R E''_R+b_R E''_G+c_R E''_B;\quad E_{GM}=a_G E''_R+b_G E''_G+c_G E''_B;$$

$$E_{BM}=a_B E''_R+b_B E''_G+c_B E''_B. \quad (4.139)$$

Можно считать, что действие матрицы эквивалентно коррекции спектральных характеристик камеры например $\bar{r}'_{\text{п}}$, w_λ, $\bar{b}'_{\text{п}}$, и превращению их в эквивалентные характеристики $\bar{r}''_{\text{п}}$, $\bar{g}''_{\text{п}}$, $\bar{b}''_{\text{п}}$, приближающиеся к идеальным, причем

$$\bar{r}''_{\text{п}}=a_R \bar{r}'_{\text{п}}+b_R w_\lambda+c_R \bar{b}'_{\text{п}};\quad \bar{g}''_{\text{п}}=a_G \bar{r}'_{\text{п}}+b_G w_\lambda+c_G \bar{b}'_{\text{п}};$$

$$\bar{b}''_{\text{п}}=a_B \bar{r}'_{\text{п}}+b_B w_\lambda+c_B \bar{b}'_{\text{п}}. \quad (4.140)$$

Таким образом, для определения коэффициентов матрицирования a, b, c необходимо знать сигналы $E_{R\text{о}}$, $E_{G\text{о}}$, $E_{B\text{о}}$, E''_R, E''_G, E''_B для каждого из тест-цветов, колнчество которых m. Для упрощения расчета этих сигналов следует должным образом выбрать тест-цвета (их спектральные плотности P_λ).

Выбор тест-цветов для расчета коэффициентов матрицирования.

Для упрощения расчета координат цветности и значений яркости (в трихроматических единицах T) тест-цветов следует их выбирать с с прямоугольными спектрами [60], как показано на рис.4.26, где P'_λ и P'_0 — спектральные плотности (в относительных единицах). Изменяя λ_1, λ_2, $\Delta\lambda$, можно получить m теоретических тест-цветов. При этом должно быть $P'_0>0$, чтобы насыщенность этих цветов была меньше, чем у спектральных, т. е. чтобы на диаграмме цветностей эти цвета были представлены точками внутри треугольника EC из табл. 3.4. Обычно $P'_0=0{,}1\ \ldots\ 0{,}2$. Увеличение $\Delta\lambda$ также снижает насыщенность тест-цвета. Рис. 4.26, *а* означает тест-цвета со спектральными цветовыми тонами, рис. 4.26, *б* — пурпурные тест-цвета. Определим координаты цвета для тест-цветов из рис. 4.26, *а*:

$$X=\delta_\lambda \sum_{380}^{780} \bar{x}P'_\lambda=\delta_\lambda \sum_{380}^{780} \bar{x}P'_0+\delta_\lambda \sum_{\lambda 1}^{\lambda 2} \bar{x}(1-P'_0)=$$

$$=P'_0\,\delta_\lambda \sum_{380}^{780} \bar{x}+(1-P'_0)\sum_{\lambda 1}^{\lambda 2} \bar{x},$$

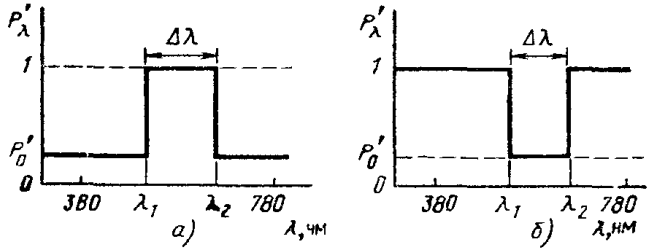


Рис. 4.26. Спектральная плотность P'_λ излучения тест-цветов (в относительных единицах)

где δ_λ — интервал на оси λ, через который берем из табл. 2.5 отсчеты $\bar{x}$ и суммы $\Sigma\bar{x} = 10,6836$; $\Sigma\bar{y} = 10,6857$; $\Sigma\bar{z} = 10,6770$. Отсюда имеем для X и по аналогии для Y и Z:

$$X = \left[P'_0 \cdot 10,6836 + (1 - P'_0) \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{x}\right] \delta_\lambda;$$

$$Y = \left[P'_0 \cdot 10,6857 + (1 - P'_0) \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{y}\right] \delta_\lambda;$$

$$Z = \left[P'_0 \cdot 10,6770 + (1 - P'_0) \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{z}\right] \delta_\lambda. \qquad (4.141)$$

В последующих расчетах δ_λ сокращается. Для пурпурных тест-цветов из рис. 4.26, *б* второе слагаемое в (4.141) надо брать со знаком «минус» перед круглой скобкой. Модуль цвета $Ц_i$, $m = X + Y + Z$, координаты цветности этого цвета $x = X/m$; $y = Y/m$; $z = Z/m$; $u = 2x/M$; $v = 3y/M$; $M = 6y - x + 1,50$. Интервал δ_λ следует брать 5 ... 10 нм.

Так же определяем координату Y_D для белого цвета D_{65}, используя для него значения P'_λ из табл. 2.12. Тогда относительные яркости тест-цветов

$$L'_Ц = Y/Y_D. \qquad (4.142)$$

Для белого D_{65} получим $X = 8,5269\ \delta_\lambda$; $Y = 8,9714\ \delta_\lambda$; $Z = 9,7624\ \delta_\lambda$; $m = 27,2607\ \delta_\lambda$. Величина $Y_D = 8,9714\ \delta_\lambda$ может быть принята за условную единицу для последующих расчетов. В табл. 4.4 представлены параметры шести таких тест-цветов, где цвета 1... 5 имеют спектральные цветовые тона, а цвет 6 — пурпурный.

Таблица 4.4

Номер тест-цвета	λ_1, мм	λ_2, нм	Y	x	y	u	v	L'	L'_R	L'_G	L'_B
1	420	480	1,3985	0,1923	0,1041	0,1990	0,1616	0,1559	0,2320	0,2594	0,5083
2	520	580	6,7728	0,3322	0,5666	0,1455	0,3722	0,7549	0,0710	0,1990	0,0001
3	460	520	3,7643	0,2172	0,3039	0,1399	0,2935	0,4196	0,0080	0,8827	0,1074
4	580	640	5,2455	0,5384	0,3834	0,3301	0,3526	0,5847	0,6243	0,3698	0,0060
5	620	680	2,4629	0,5471	0,3159	0,3842	0,3327	0,2745	0,8235	0,1524	0,0251
6	530	570	7,7417	0,3370	0,2852	0,2345	0,2977	0,8629	0,3688	0,5375	0,0945
D_{65}	380	780	8,9714	0,3128	0,3291	0,1980	0,3120	1,0000	0,2227	0,7060	0,0713

Определение видеосигналов E_{R0}, E_{G0}, E_{B0}, необходимых для воспроизведения тест-цветов без искажений их цветности. Зная координаты цветности тест-цветов $x_Ц$, $y_Ц$, находим относительные яркости основных цветов приемника L'_R, L'_G, L'_B по (3.56). При этом

$$L'_R = L_R/L_Ц;\ L_G = L_G/L_Ц;\ L'_B = L_B\ L_Ц;$$
$$L_Ц = L_R + L_G + L_B;\ L'_R + L'_G + L'_B = 1, \qquad (4.143)$$

где L_R, L_G, L_B, $L_Ц$, кд/м^2. По аналогии с (3.195) напишем

$$L_R = g_R (E'_{R\text{к}})^{\gamma_\text{к}};\ L_G = g_G (E'_{G\text{к}})^{\gamma_\text{к}};\ L_B = g_B (E'_{B\text{к}})^{\gamma_\text{к}}, \qquad (4.144)$$

где g_R, g_G, g_B — коэффициенты преобразования напряжения в яркость в цветном кинескопе; $E'_{R\text{к}}$, $E'_{G\text{к}}$, $E'_{B\text{к}}$ — размахи видеосигналов на электронных прожекторах кинескопа, отсчитанные от напряжения запирания луча, подвергнутые гамма-коррекции; $\gamma_\text{к} = 2{,}8$ определено стандартом (полагаем, что значение $\gamma_\text{к}$ одинаково и постоянно для трех электронных прожекторов кинескопа).

Для определения g_R, g_G, g_B поступим следующим образом. Используем модуляционную характеристику цветного кинескопа вида $L_\text{б} = f(I_{\text{а2б}})$, где $L_\text{б}$ — яркость свечения экрана белого цвета 9300 К + + 27 MPCD ($x = 0{,}281$; $y = 0{,}311$), $I_{\text{а2б}}$ — суммарный ток второго анода и теневой маски кинескопа на этом цвете (в справочниках обычно приводится эта характеристика). Этот ток складывается из токов трех прожекторов:

$$I_{R\text{б}} = \rho_{R\text{б}} I_{\text{а2б}};\ I_{G\text{б}} = \rho_{G\text{б}} I_{\text{а2б}};\ I_{B\text{б}} = \rho_{B\text{б}} I_{\text{а2б}};$$
$$\rho_{R\text{б}} + \rho_{G\text{б}} + \rho_{B\text{б}} = 1;\ I_{\text{а2б}} = I_{R\text{б}} + I_{GB} + I_{B\text{б}}. \qquad (4.145)$$

Зададимся напряжением на втором аноде кинескопа $u_{\text{а}2}$ и яркостью $L_\text{б}$, например $L_\text{б} = L_0$, и найдем из модуляционной характеристики ток $I_{\text{а2б}}$ при этой яркости. Зная коэффициенты $\rho_{R\text{б}}$, $\rho_{G\text{б}}$, $\rho_{B\text{б}}$ (3.214), типовые значения которых $\rho_{R\text{б}} = 0{,}42$; $\rho_{G\text{б}} = 0{,}3$; $\rho_{B\text{б}} = 0{,}28$, находим токи $I_{R\text{б}}$, $I_{G\text{б}}$, $I_{B\text{б}}$ из (4.145). Далее из модуляционной характеристики кинескопа вида $I_{\text{а}2} = f(E_c)$, где E_c — размах видеосигнала между модулятором и катодом, находим размахи сигналов $E'_{R\text{б.к}}$, $E'_{G\text{б.к}}$, $E'_{B\text{б к}}$ на катодах кинескопа, необходимые для получения найденных выше токов трех лучей для белого 9300К + 27 MPCD. По (3.56) находим относительные яркости $L'_{R\text{б}}$, $L'_{G\text{б}}$, $L'_{B\text{б}}$ для получения этого цвета свечения экрана кинескопа. Из (4.143), подставляя L_0 вместо $L_Ц$, находим яркости свечения люминофоров $L_{R\text{б}}$, $L_{G\text{б}}$, $L_{B\text{б}}$, кд/м^2, необходимые для получения яркости $L_\text{б} = L_0$. Далее по (4.144) определяем g_R, g_G, g_B, например $g_R = L_{R\text{б}}/(E'_{R\text{б.к}})^{\gamma_\text{к}}$. Для определения яркостей тест-цветов $L_Ц$, кд/м^2, воспроизводимых на экране кинескопа без искажений, поступаем следующим образом. Задаемся яркостью белого цвета D_{65} на экране кинескопа, например $L_D = L_0$, кд/м^2, тогда

$$L_Ц = L'_Ц L_D = L'_Ц L_0. \qquad (4.146)$$

где $L'_{ц}$ — из (4.142). Далее определяем яркости L_R, L_G, L_B, кд/м^2, необходимые для получения на экране кинескопа неискаженных тест-цветов с яркостями $L_{ц}$ из (4.146) и белого D_{65} с яркостью $L_D = L_0$. Из (4.143) имеем $L_R = L'_R L_{ц}$; $L_G = L'_G L_{ц}$; $L_B = L'_B L_{ц}$; где L'_R, L'_G, L'_B, были определены выше. Для белого D_{65} с яркостью $L_D = L_0$ имеем $L_{RD} = \alpha L_0$; $L_{GD} = \beta L_0$; $L_{B0} = \delta L_0$, где α, β, δ — из (3.57).

Теперь определим размахи видеосигналов E_{R0}, E_{G0}, E_{B0} на выходе субматриц (см. рис. 4.24, точка A). Рассмотрим канал R на рис. 4.24. Сигнал E'_{R0} $E'^{1/\gamma_{гк}}_{R0}$ с выхода гамма-корректора создает на выходе видеоусилителя с коэффициентом усиления k_R сигнал $E'_{R0\,к} = K_R E'_{R0}$ $K_R E'^{1/\gamma_{гк}}_{R0}$, который создает яркость свечения люминофора кинескопа L_R — $g_R (E'_{R0.к})^{\gamma_к}$ из (4.144). Отсюда

$$L_R \quad g_R (k_R E'_{R0})^{\gamma_к} = g_R \left(k_R E'^{1/\gamma_{гк}}_{R0}\right)^{\gamma_к} = g_R k_R^{\gamma_к} E'^{\gamma_к \gamma_{гк}}_{R0}.$$

Так как $\gamma_к$ $\gamma_{гк}$, то L_R — $g_R k_R E_{R0}$. Отсюда и по аналогии для каналов G и B имеем

$$E_{R0} = L_R \left(g_R k_R^{\gamma_к}\right); \; E_{G0} = L_G/\left(g_G k_G^{\gamma_к}\right); \; E_{B0} = L_B/\left(g_B k_B^{\gamma_к}\right). \qquad (4.147)$$

Находим из (4.114) размахи сигналов, подаваемых на кинескоп, необходимые для создания белого D_{65} с яркостью L_D — L_0:

$$E_{R0Dк} \quad (L_{RD}/g_R)^{1/\gamma_к}; \; E_{G0Dк} = (L_{GD}/g_G)^{1/\gamma_к};$$

$$E_{B0Dк} = (L_{BD}/g_B)^{1/\gamma_к}. \qquad (4.148)$$

Из (4.128) следует, что при передаче белого цвета D_{65} сигналы в точке A (см. рис. 4.24) должны отвечать условию

$$E_{R0D} - E_{G0D} = E_{B0D} = E_{0D}. \qquad (4.149)$$

Из (4.147) и (4.149) получим необходимые для получения яркостн цвета D_{65} на экране кинескопа, равной $L_D = L_0$, коэффициенты усиления

$$k_R = [L_{RD}/(g_R E_{0D})]^{1/\gamma_к}; \; k_G = [L_{GD}/(g_G E_{0D})]^{1/\gamma_к};$$

$$k_B = [L_{BD}/(g_B E_{0D})]^{1/\gamma_к}. \qquad (4.150)$$

Подставив (4.149) в (4.147), получим

$$g_R k_R^{\gamma_к} = L_{RD}/E_{0D}; \; g_G k_G^{\gamma_к} \quad L_{GD}/E_{0D}; \; g_B k_B^{\gamma_к} = L_{BD}/E_{0D}, \qquad (4.151)$$

где L_{RD}, L_{GD}, L_{BD}, g_R, g_G, g_B были определены выше.

Подставив (4.151) в (4.147), получим в точке A схемы на рис. 4.24 необходимые для получения неискаженного воспроизведения тест-цветов на экране кинескопа с яркостями L_R, L_G, L_B искомые размахи сигналов

$$E_{R0} = E_{0D} L_R/L_{RD}; \; E_{G0} = E_{0D} L_G/L_{GD};$$

$$E_{B0} = E_{0D} L_B/L_{BD}. \qquad (4.152)$$

Определение видеосигналов E''_R, E''_G, E''_B на входе матрицы при передаче тест-цветов. Пусть эти сигналы создаются камерой типа WRB, имеющей спектральные характеристики $\bar{r}'_п$, w_λ, $\bar{b}'_п$. Тогда на входе субматриц сигналы

$$E''_R = d_R E_R = d_R C_1 \sum \bar{r}'_п P_\lambda = d_R C_1 P_{\lambda a} \sum \bar{r}'_п P'_\lambda;$$
$$E''_G = d_W E_W = d_W C_2 \sum w_\lambda P_\lambda = d_W C_2 P_{\lambda a} \sum w_\lambda P'_\lambda;$$
$$E''_B = d_B E_B = d_B C_3 \sum \bar{b}'_п P_\lambda = d_B C_3 P_{\lambda a} \sum \bar{b}'_п P'_\lambda, \qquad (4.153)$$

где E_R, E_W, E_B — видеосигналы на выходе передающих трубок; d_R, d_W, d_B — коэффициенты усиления видеоусилителей; $P_\lambda = P_{\lambda a} P'_\lambda$ — спектральные плотности излучения тест-цветов, Вт/нм, на волнах λ и λ_a соответственно; P'_λ — относительная спектральная плотность этого излучения (относительно $P_{\lambda a}$); C_1, C_2, C_3 — коэффициенты пропорциональности. При этом в (4.153) имеем

$$E_R = C_1 \sum \bar{r}'_п P_\lambda; \quad E_W = C_2 \sum w_\lambda P_\lambda; \quad E_B = C_3 \sum \bar{b}'_п P_\lambda.$$

Для определения множителей, стоящих в (4.153) перед знаком суммы, найдем видеосигналы E''_{RD}, E''_{GD}, E''_{BD} на входе матрицы при передаче белого цвета D_{65}. Для этого случая обозначим E_{RD}, E_{WD}, E_{BD} — видеосигналы на выходе передающих трубок, $P_{\lambda D}$ и $P_{\lambda 6D}$ — — спектральные плотности излучения, Вт/нм, цвета D_{65} на волнах λ и λ_6 соответственно. Тогда $P_{\lambda D} = P_{\lambda 6D} P'_{\lambda D}$; где $P'_{\lambda D}$ — относительная спектральная плотность излучения цвета D_{65} (относительно $P_{\lambda 6D}$). По аналогии с (4.153) имеем:

$$E''_{RD} = d_R E_{RD} = d_R C_1 P_{\lambda 6D} \sum \bar{r}'_п P'_{\lambda D};$$
$$E''_{GD} = d_W E_{WD} = d_W C_2 P_{\lambda 6D} \sum w_\lambda P'_{\lambda D};$$
$$E''_{BD} = d_B E_{BD} = d_B C_3 P_{\lambda 6D} \sum \bar{b}'_п P'_{\lambda D}. \qquad (4.154)$$

Из (4.128) и (4.152) получим

$$d_R C_1 P_{\lambda 6D} = E_{oD} / \sum \bar{r}'_п P'_{\lambda D} = E_{oD} B_1;$$
$$d_W C_2 P_{\lambda 6D} = E_{oD} / \sum w_\lambda P'_{\lambda D} = E_{oD} B_2;$$
$$d_B C_3 P_{\lambda 6D} = E_{oD} / \sum \bar{b}'_п P'_{\lambda D} = E_{oD} B_3, \qquad (4.155)$$

где $B_1 = 1 / \sum \bar{r}'_п P'_{\lambda D}$; $B_2 = 1 / \sum w_\lambda P'_{\lambda D}$;

$$B_3 = 1 / \sum \bar{b}'_п P'_{\lambda D}. \qquad (4.156)$$

Подставив в (4.153) $d_R C_1$, $d_W C_2$, $d_B C_3$ из (4.155) и полагая $P_{\lambda a} = — P_{\lambda 6D}$, получим

$$E''_R = E_{oD} B_1 \sum \bar{r}'_п P'_\lambda; \quad E''_G = E_{oD} B_2 \sum w_\lambda P'_\lambda;$$
$$E''_B = E_{oD} B_3 \sum \bar{b}'_п P'_\lambda. \qquad (4.157)$$

Отсюда находим E''_R, E''_G, E''_B для тест-цветов и в целях контроля для белого D_{65}, для которого должно выполняться условие (4.128).

Определение эффективности применения цветокорректирующей матрицы. Эффективность действия этой матрицы можно оценить, сравнивая ошибки цветопередачи в изображении тест-цветов на экране кинескопа при применении матрицы и без нее. Вначале определим ошибки цветопередачи без применения матрицы. По (4.156) и (4.157) находим сигналы E''_R, E''_G, E''_B в точке A (рис. 4.24) для тест-цветов. Обозначим $L''_{R\text{и}}$, $L''_{G\text{и}}$, $L''_{B\text{и}}$ — яркости свечения люминофоров кинескопа, кд/м², создаваемые этими сигналами. Подставляя в (4.151) $L''_{R\text{и}}$, $L''_{G\text{и}}$, $L''_{B\text{и}}$ вместо L_R, L_G, L_B и E''_R, E''_G, E''_B вместо $E_{R\text{о}}$, $E_{G\text{о}}$, $E_{B\text{о}}$, получим

$$L''_{R\text{и}} = L_{RD} E''_R / E_{OD};\ L''_{G\text{и}} = L_{GD} E''_G / E_{OD};\ L''_{B\text{и}} = L_{BD} E''_B / E_{OD}. \qquad (4.158)$$

По аналогии с (4.143) можно написать

$$L'_{R\text{и}} = L''_{R\text{и}} / L''_{\text{ц и}};\ L'_{G\text{и}} = L''_{G\text{и}} / L''_{\text{ц и}};\ L'_{B\text{и}} = L''_{B\text{и}} / L''_{\text{ц и}};$$
$$L''_{\text{ц}} \cdot L''_{R\text{и}} + L''_{G\text{и}} + L''_{B\text{и}};\ L'_{R\text{и}} + L'_{G\text{и}} + L'_{B\text{и}} = 1, \qquad (4.159)$$

где $L''_{\text{ц и}}$ — яркость тест-цвета на экране кинескопа, кд/м², $L'_{R\text{и}}$, $L'_{G\text{и}}$, $L'_{B\text{и}}$ — относительные яркости люминофоров при воспроизведении тест-цветов.

По аналогии с (4.146)

$$L'_{\text{ц и}} = L''_{\text{ц и}} / L_D. \qquad (4.160)$$

Зная для тест-цветов яркости из (4.159), находим из (3.56) координаты цветности $x_{\text{и}}$, $y_{\text{и}}$ изображения тест-цветов на экране кинескопа. Для треугольника основных цветов приемника ЕС (см. табл. 3.4) и белого D_{65} в качестве равностимульного цвета $Ц_{\text{и}}$ получим

$$x_{\text{и}} = (0{,}00763 L'_{R\text{и}} + 0{,}02744 L'_{G\text{и}} \quad 0{,}03402)/A_1;$$
$$y_{\text{и}} = (0{,}540 x_{\text{и}} - 0{,}0726)/A_2;$$
$$A_1 = (0{,}1856 L'_{R\text{и}} + 0{,}20412 L'_{G\text{и}} - 0{,}2268;$$
$$A_2 = 0{,}6873 L'_{R\text{и}} + 0{,}140. \qquad (4.161)$$

Зная $x_{\text{и}}$, $y_{\text{и}}$, находим для тест-цветов координаты цветности u, v МКО 1960 г. по формулам $u = 2x/M$; $v = 3y/M$; $M = 6y - x + 1{,}50$. Ошибки (искажения) координат цветности тест-цветов на экране кинескопа

$$\Delta x = x_{\text{и}} - x_{\text{о}};\ \Delta y = y_{\text{и}} - y_{\text{о}};\ \Delta u = u_{\text{и}} - u_{\text{о}};\ \Delta v = v_{\text{и}} - v_{\text{о}}, \qquad (4.162)$$

где $x_{\text{о}}$, $y_{\text{о}}$, u_0, v_0 — координаты цветности неискаженных тест-цветов из табл. 4.4.

Частные ошибки (т. е. для каждого цвета) цветности и яркости воспроизводимых на экране кинескопа тест-цветов определяются по следующим формулам:

$$\varepsilon_{\text{ц}xy} = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2};\ \varepsilon_{\text{я}} = \ln (L'_{\text{ц и}} / L'_{\text{ц.о}});$$

$$\varepsilon_{ц(п.ц)} = \sqrt{(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2}/0{,}00384;$$

$$\varepsilon_{я(п.я)} = \varepsilon_я/0{,}02;\ \varepsilon_п = \sqrt{\varepsilon^2_{ц(п.ц)} + \varepsilon^2_{я(п\ я)}}, \qquad (4.163)$$

где $\varepsilon_{ц\,xy}$ — ошибка цветности в единицах x, y; $\varepsilon_я$ — ошибка яркости; $L'_{ц.и}$ — из (4.160); $L'_{ц.о} = Y/Y_D$ — относительная яркость тест-цвета из (4.142) и табл. 4.4; $\varepsilon_{ц(п.ц)}$ — ошибка цветности в количестве средних цветовых порогов; $\varepsilon_{я(п.я)}$ — ошибка яркости в количестве средних порогов яркости; $\varepsilon_п$ — полная ошибка цветопередачи данного тест-цвета.

Для набора из m тест-цветов можно определить средне-арифметические величины ошибок $\bar{\varepsilon}_{ц(п.ц)}$, $\bar{\varepsilon}_{я(п.я)}$, $\bar{\varepsilon}_п$, а также среднеквадратическую ошибку и эффективную полную ошибку соответственно

$$\varepsilon_{СКО} = (1/m)\sqrt{\sum_1^m \varepsilon^2_{п_i}};\ \bar{\varepsilon}_{э.п} = \sqrt{\bar{\varepsilon}^2_{ц(п\ ц)} + \bar{\varepsilon}^2_{я(п.я)}}. \qquad (4.164)$$

Далее определим ошибки цветопередачи с применением цветокорректирующей матрицы. Сигналы E_{RM}, E_{GM}, E_{BM}, определенные по (4.139), в которых коэффициенты a, b, c с индексами R, G, B определены по (4.129) и (4.138), а сигналы E''_R, E''_G, E''_B, полученные по (4.157), создают яркости свечения люминофоров кинескопа, кд/м^2, равные $L''_{Rи}$, $L''_{Gи}$, $L''_{Bи}$. Эти яркости найдем, подставив сигналы E_{RM}, E_{GM}, E_{BM} в (4.158) вместо E''_R, E''_G, E''_B. Тогда имеем

$$L''_{Rи} = L_{RD}E_{RM}/E_{OD};\ L''_{Gи} = L_{GD}E_{GM}/E_{OD};$$

$$L''_{Bи} = L_{BD}E_{BM}/E_{OD}. \qquad (4.165)$$

Используя далее (4.159) ... (4.164), определяем ошибки цветопередачи при применении цветокорректирующей матрицы. Наиболее удобно сравнивать оценки $\bar{\varepsilon}_{ц(п.и)}$ и $\bar{\varepsilon}_{я(п.и)}$ с таковыми, без применения матрицы (эти ошибки не должны превышать допустимых пределов). Можно также оценить эффективность действия матрицы, сравнивая эквивалентные спектральные характеристики из (4.140) с идеальными. Для отдельных тест-цветов ошибки цветопередачи при применении матрицы могут возрасти (без нее для этих цветов ошибки также значительны).

4.5. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СИГНАЛЫ ЦВЕТНЫХ ПОЛОС

Для расчета и нормирования параметров тракта передачи и приема сигналов цветного телевидения и настройки аппаратуры применяют испытательные сигналы, создающие на экране цветного кинескопа изображение из шести вертикальных цветных полос, белой полосы с цветом *Б* и черной полосы, как показано на рис. 4.27*. Цветные полосы воспроизводят основные цвета $R_п$, $G_п$, $B_п$ приемника ЕС (см. табл. 3.4) и дополнительные к ним — *Г*, *П*, *Ж* (голубой, пурпурный, желтый). Яркость полос убывает слева направо. Каждый из цветов *Г*, *П*, *Ж* получается как смесь двух основных цветов и изобра-

жается точкой на стороне треугольника $R_п$ $G_п$ $B_п$, как показано на рис. 4.28. Это треугольник NTSC (см. табл. 3.4). В качестве цвета *Б* белой полосы выбран белый цвет *С* ($x = 0{,}3101$; $y = 0{,}3162$), это цвет равностимульный для этого треугольника. Поэтому цвет *Б* создается как смесь основных цветов $R_п$, $G_п$, $B_п$ с равными координатами цвета и яркостями L_R, L_G, L_B.

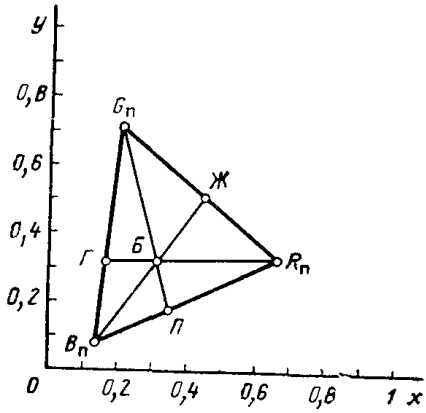


Рис. 4.28. Цвета *Г*, *П*, *Ж*, *Б* на диаграмме цветностей, образующие вместе с цветами $R_п$, $G_п$, $B_п$ сигнал цветных полос на треугольнике NTSC и белом *С* в качестве $Ц_р(Б=C)$

Цвет *Г* создается как смесь цветов $B_п$ и $G_п$; цвет *П* — как смесь цветов $R_п$ и $B_п$; цвет *Ж* — как смесь цветов $R_п$ и $G_п$, при этом яркости двух основных цветов в этих смесях такие же, как при создании белого цвета *Б*, а яркость третьего основного цвета при этом равна нулю. Точки *Г*, *П*, *Ж* на рис. 4.28 являются точками пересечения сторон треугольника с прямыми, проходящими из вершин треугольника через точку *Б*.

При получении полос с цветами $R_п$, $G_п$, $B_п$ соответствующий основной цвет имеет такую же яркость, как при получении цвета *Б*, а яркости двух других основных цветов, при этом равны нулю. Для цвета *Ц* смеси двух цветов $Ц_1$ и $Ц_2$ с яркостями L_1 и L_2 и координатами цветности x_1, y_1, x_2, y_2 имеем из (2.291)

$$x_ц = \frac{(L_1 x_1/y_1)+(L_2 x_2 y_2)}{Q};$$

$$y_ц = \frac{L_1+L_2}{Q}; \quad Q = \frac{L_1}{y_1} + \frac{L_2}{y_2}. \tag{4.166}$$

где L_1 и L_2 можно заменить относительными яркостями L_1' и L_2' из (3.57), как как L_1 и L_2 входят как в числитель, так и в знаменатель этих выражений для $x_ц$ и $y_ц$. В табл. 4.5 даны результаты расчета по (4.166) с использованием данных табл. 3.4.

Таблица 4.5

Цвет смеси	Смешиваемые цвета	x_1	y_1	x_2	y_2	L_1'	L_2'	$x_ц$	$y_ц$
Г	$B_п+G_п$	0,14	0,08	0,21	0,71	0,1144	0,5866	0,1657	0,3107
П	$R_п+B_п$	0,67	0,33	0,14	0,08	0,2990	0,1144	0,3456	0,1770
Ж	$R_п+G_п$	0,67	0,33	0,21	0,71	0,2990	0,6866	0,4506	0,5112

Белый цвет *Б* является также и равносигнальным, поэтому сигналы основных цветов E'_R, E'_G, E'_B образующие координаты цвета $R_п$,

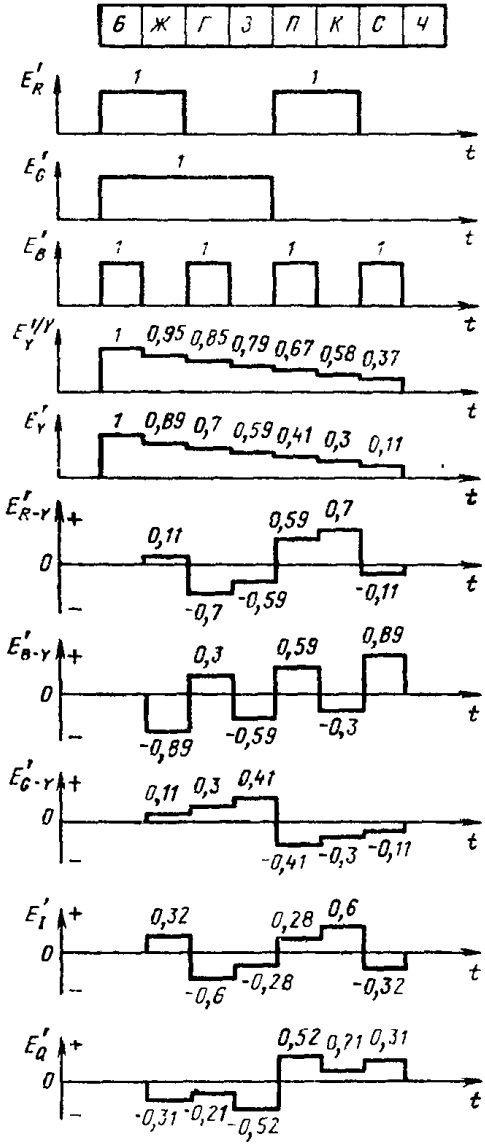


Рис. 4.29. Сигналы цветных полос максимальных (100%) яркости и насыщенности

Таблица 4.6

Цвет полос	E'_R	E'_G	E'_B	E'_Y	E'_Y
Белый	1	1	1	1,00000	1,00000
Желтый	1	1	0	0,85552	0,94624
Голубой	0	1	1	0,70110	0,85091
Зеленый	0	1	0	0,58662	0,78471
Пурпурный	1	0	1	0,41338	0,66929
Красный	1	0	0	0,29890	0,57757
Синий	0	0	1	0,11448	0,37338
Черный	0	0	0	0	0

Цвет полос	E'_Y	E'_{R-Y}	E'_{G-Y}
Белый	1,00000	0	0
Желтый	0,85552	0,11448	0,11448
Голубой	0,70110	−0,70110	0,29890
Зеленый	0,58662	−0,58662	0,41338
Пурпурный	0,41338	0,58662	−0,41338
Красный	0,29890	0,70110	−0,29890
Синий	0,11448	−0,11448	−0,11448
Черный	0	0	0

Цвет полос	E'_{B-Y}	E'_I	E'_Q
Белый	0	0	0
Желтый	−0,88552	0,32189	−0,31132
Голубой	0,29890	−0,59588	−0,21132
Зеленый	−0,58662	−0,27398	−0,52264
Пурпурный	0,58662	0,27398	0,52264
Красный	−0,29890	0,59588	0,21132
Синий	0,88552	−0,32189	0,31132
Черный	0	0	0

$G_п$, $B_п$ будут для него равны друг другу на входах матричных схем (образующих цветоразностные сигналы и сигнал яркости E'_Y), причем размахи этих сигналов будут максимальными (чтобы создать цвет $Б$ с максимальной яркостью); эти размахи удобно принять равными 1. Это способствует тому, что при приеме черно-белой программы на цветной телевизор белый цвет создается под действием сигнала яркости, подаваемого на три электронных прожектора цветного кинескопа вместо сигналов E'_R, E'_G, E'_B.

Для цветов *Г*, *П*, *Ж*, являющихся смесью двух основных цветов, одна из координат цвета $R_п$, $G_п$, $B_п$ равна нулю, также один из сигналов E'_R, E'_G, E'_B равен нулю, а два других сигнала равны 1.

В табл. 4.6 даны значения сигналов основных цветов, сигнала яркости и цветоразностных сигналов для цветных полос с максимальными (100 %) насыщенностью и яркостью, рассчитанные по (4.5), (4.3), (4.7), (4.16), (4.24) при $\alpha = 0{,}3$; $\beta = 0{,}59$; $\delta = 0{,}11$; $\gamma = 2{,}2$, а на рис. 4.29 показаны эти сигналы; в табл. 4.7 даны их максимальные размахи, откуда следует, что сигнал E'_{G-Y} имеет размах меньший, чем сигналы E'_{R-Y} и E'_{B-Y}, поэтому для получения в приемнике лучшего отношения сигнал-шум принято передавать в приемник сигналы E'_{R-Y} и E'_{B-Y}.

Таблица 4.7

Сигнал	Максимальный размах	Сигнал	Максимальный размах
E'_Y	1	E'_{G-Y}	$2\times0{,}41=0{,}82$
E'_{R-Y}	$2\times0{,}70=1{,}4$	E'_I	$2\ 0{,}60=1{,}20$
E'_{B-Y}	$2\times0{,}89=1{,}78$	E'_Q	$2\times0{,}52=1{,}04$

Испытательный сигнал цветных полос в виде сигналов E'_R, E'_G, E'_B (см. табл. 4.6) вырабатывается генератором цветных полос ГЦП, на выходе которого создаются импульсы (три верхние осциллограммы на рис. 4.29), синхронизированные и сфазированные строчными ведущими импульсами, синхрогенератора или от собственного генератора частоты строк.

Если размахи сигналов E'_R, E'_G, E'_B меньше 1, то яркости образуемых ими цветов и их насыщениости будут меньше максимальных, сигнал яркости E'_Y и цветоразностные сигналы при этом уменьшаются. В табл. 4.8 даны значения сигналов цветных полос при 75 % яркости и 100 % насыщенности при тех же значениях α, β, δ, γ, что и в табл. 4.6.

В табл. 4.9 даны значения сигналов цветных полос с 75 %-ной амплитудой и 100 %-ной насыщенностью (при 100 %-ной амплитуде на белом), которые часто находят практическое применение (α, β, δ, γ — как в табл. 4.6).

В табл. 4.10 даны значения сигналов цветных полос с 95 % -ной насыщенностью при $\gamma = 2{,}2$, которые близки к условиям практики. Здесь один или два сигнала E'_R, E'_G, E'_B равны 1 и один или два таких сигнала равны 0,05, где $0{,}05^{1/\gamma} = 0{,}05^{1/2{,}2} = 0{,}256$.

При изменении насыщенности цветов и сохранения максимальной амплитуды сохраняется отношение модулей сигналов $M = |E'_{R-Y}/E'_{B-Y}|$. Например, для цвета *Ж* при 100 %-ной насыщенности и

Таблица 4.8

Цвет полос	E_R	E_G	E_B	E'_R	E'_G	E'_B
Белый	0,75	0,75	0,75	0,88	0,88	0,88
Желтый	0,75	0,75	0	0,88	0,88	0
Голубой	0	0,75	0,75	0	0,88	0,88
Зеленый	0	0,75	0	0	0,88	0
Пурпурный	0,75	0	0,75	0,88	0	0,88
Красный	0,75	0	0	0,88	0	0
Синий	0	0	0,75	0	0	0,88
Черный	0	0	0	0	0	0

Цвет полос	E_Y	$E_Y^{1/\gamma}$	E'_Y	E'_{R-Y}	E'_{G-Y}	E'_{B-Y}
Белый	0,75000	0,87743	0,87743	0	0	0
Желтый	0,66414	0,83025	0,77698	0,10045	0,10045	—0,77698
Голубой	0,52582	0,74664	0,61517	—0,61517	0,26226	0,26226
Зеленый	0,43996	0,68852	0,51472	—0,51472	0,36271	—0,51472
Пурпурный	0,31004	0,58726	0,36271	0,51472	—0,36271	0,51472
Красный	0,22418	0,50678	0,26226	0,61517	—0,26226	—0,26226
Синий	0,85860	0,32762	0,10045	—0,10045	—0,10045	0,77698
Черный	0	0	0	0	0	0

Таблица 4.9

Цвет полос	E'_R	E'_G	E'_B	E'_Y	E'_{R-Y}	E'_{G-Y}	E'_{B-Y}
Белый	1	1	1	1	0	0	0
Желтый	0,75	0,75	0	0,66414	0,08586	0,08586	—0,66414
Голубой	0	0,75	0,75	0,528,3	—0,52583	0,22418	0,22418
Зеленый	0	0,75	0	0,43997	—0,43997	0,31004	—0,43997
Пурпурный	0,75	0	0,75	0,31004	0,43997	—0,31004	0,43997
Красный	0,75	0	0	0,22418	0,52583	—0,22418	—0,22418
Синий	0	0	0,75	0,08586	—0,08586	—0,08586	0,66414
Черный	0	0	0	0	0	0	0

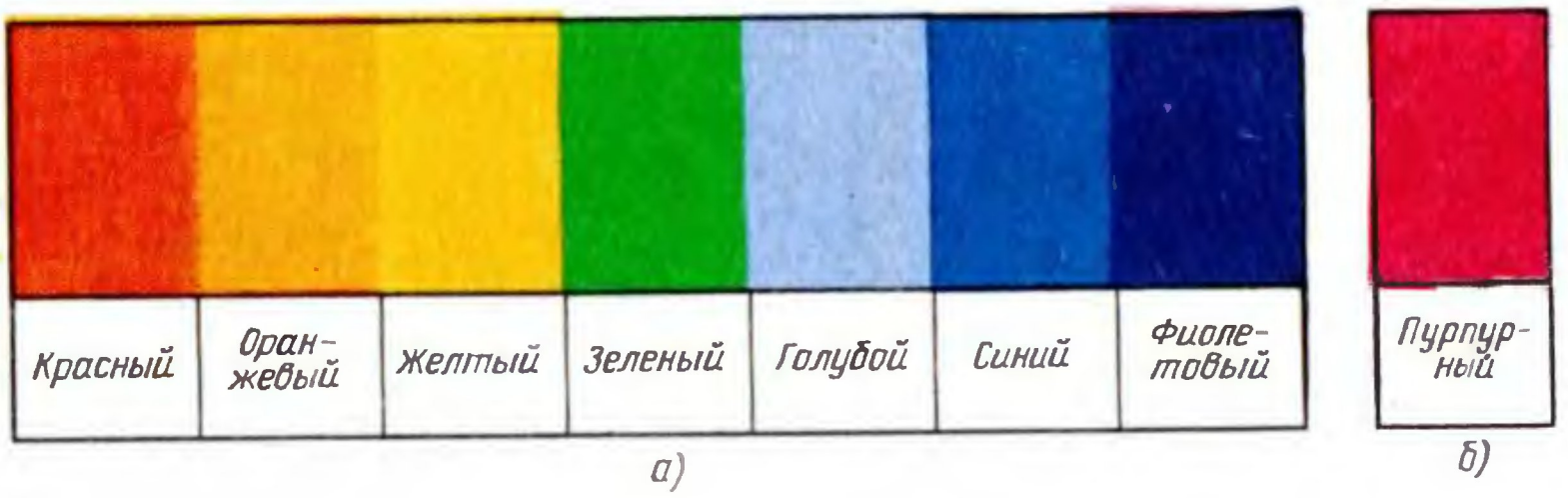


Рис. 1.1.* Гамма главных цветов:
***а* – цвета солнечного спектра; *б* – пурпурный цвет**

Рис. 1.2.* Цветовой круг И. Ньютона

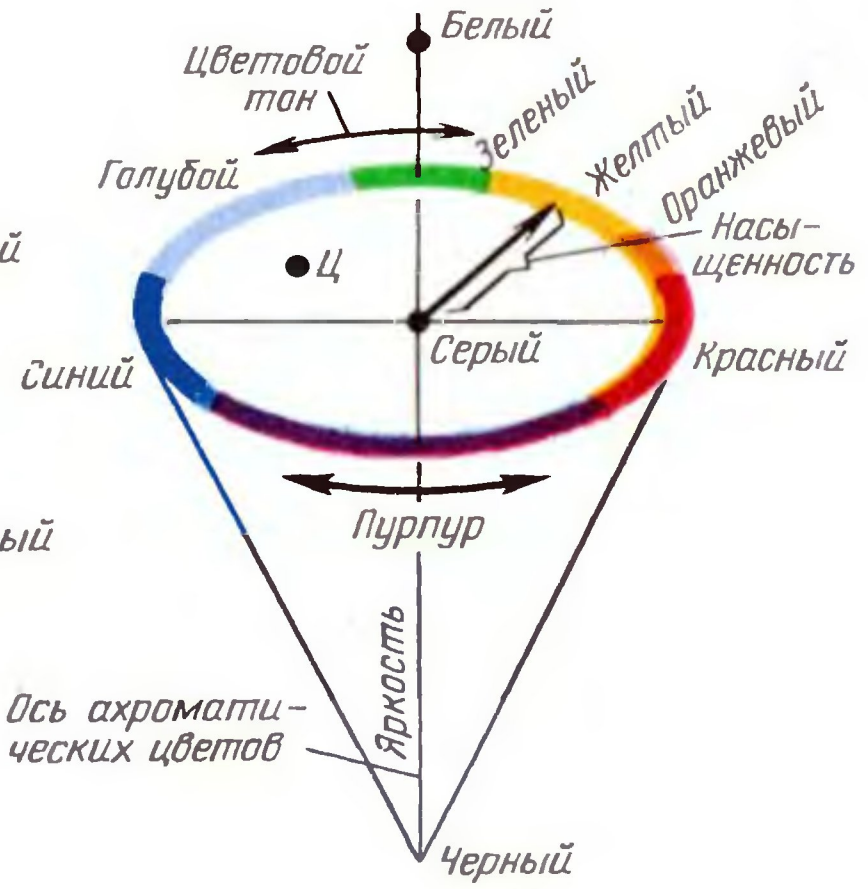
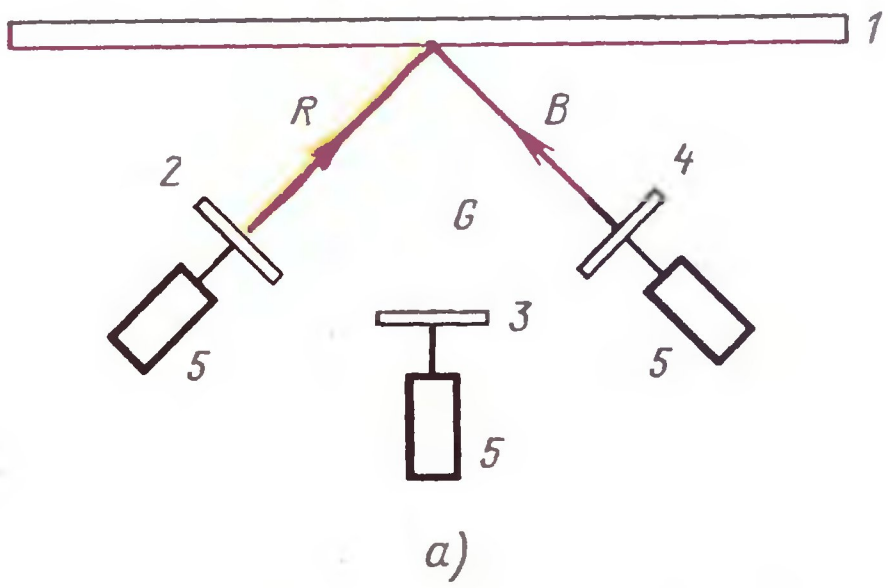


Рис. 1.5.* Представление цвета в цилиндрических координатах



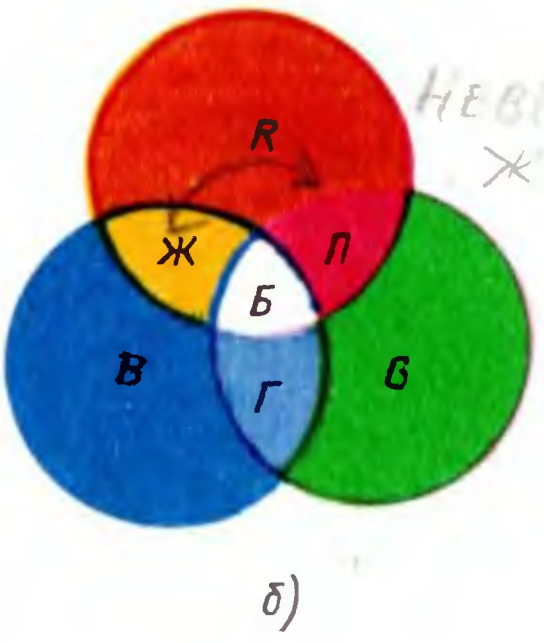


Рис. 2.1.* Аддитивное сложение цветов:
***1* – белый экран; *2, 3, 4* – красный, зеленый, синий светофильтры; *5* – источники белого цвета; *R, G, B* – красный, зеленый, синий световые лучи; *Б, Ж, П, Г* – белый, желтый, пурпурный, голубой цвета; *а* – схема сложения; *б* – цвета смеси**

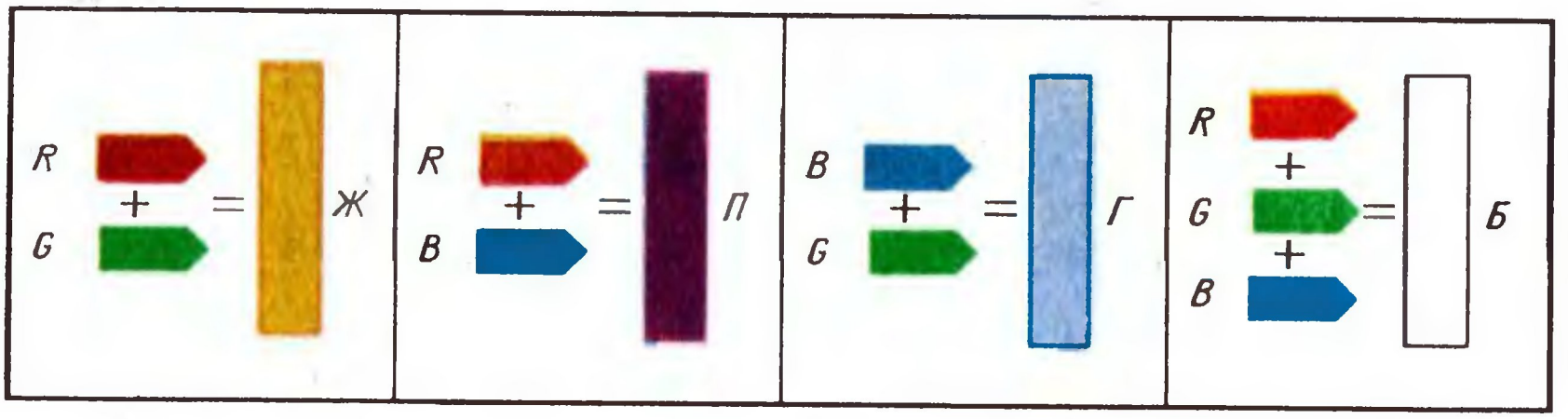


Рис. 2.2.* Варианты аудитивной смеси цветов (сложение световых порогов)

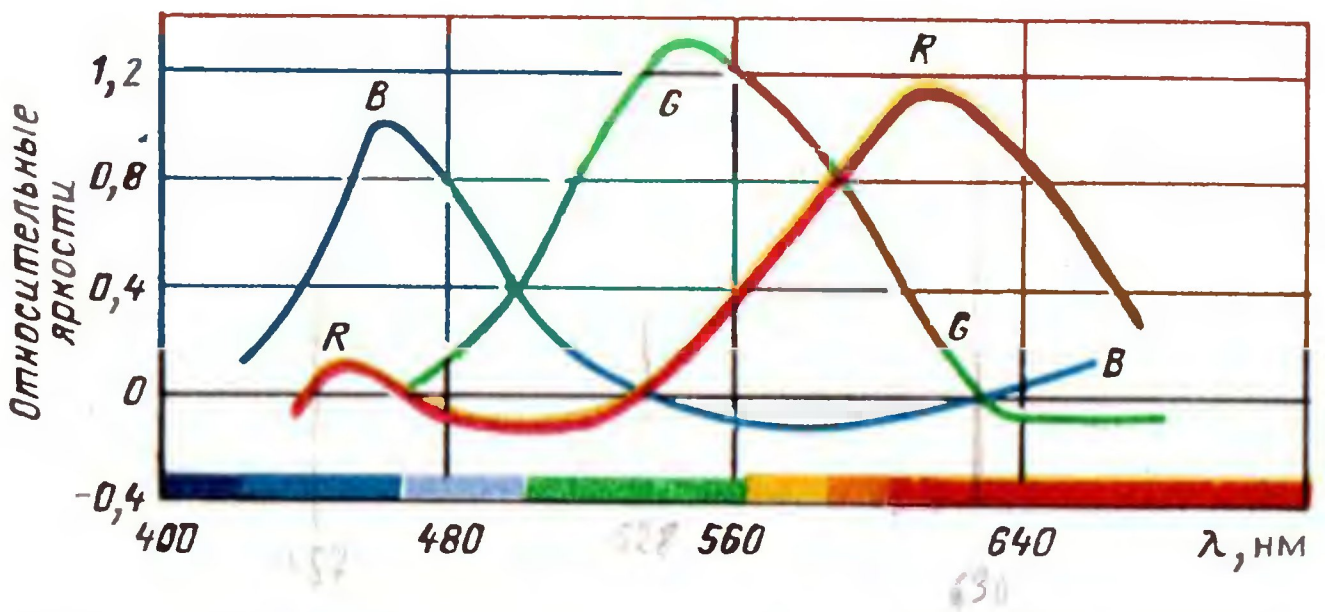


Рис. 2.32.* Зависимость координат цвета от длины волны света (кривые смешения) по Д. К. Максвеллу

Рис. 2.33.* Цветовой треугольник Д. К. Максвелла

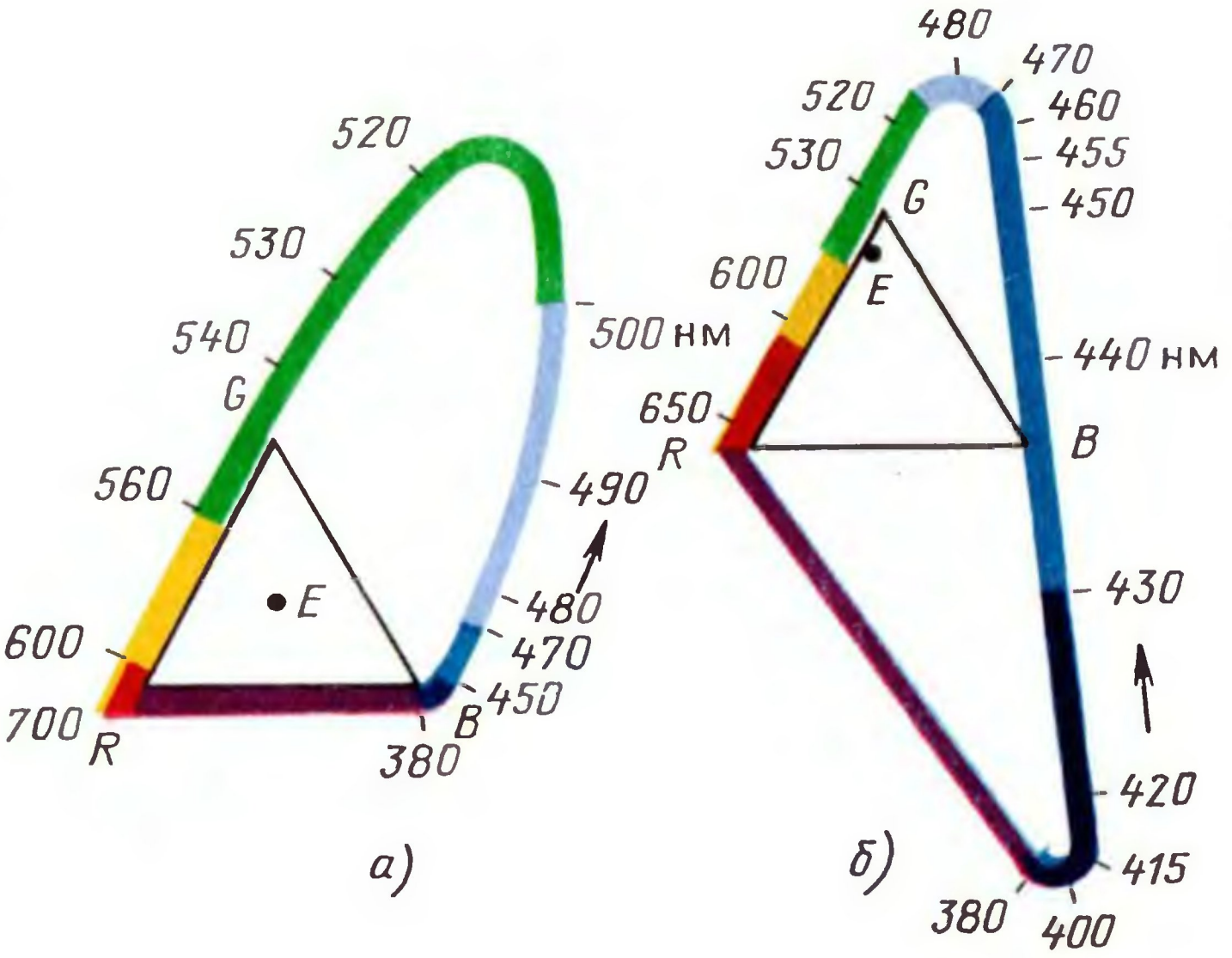


Рис. 2.34.* Спектральный локус в зональных координатах. За единицы основных цветов (700; 546,1; 435,8 нм) взяты количества:
а* – 1; 4,4907; 0,0601 светоВт для *R*, *G*, *B* соответственно, необходимые для получения белого E в качестве равностимульного цвета; *б* – 1 светоВт для *R*, *G*, *B

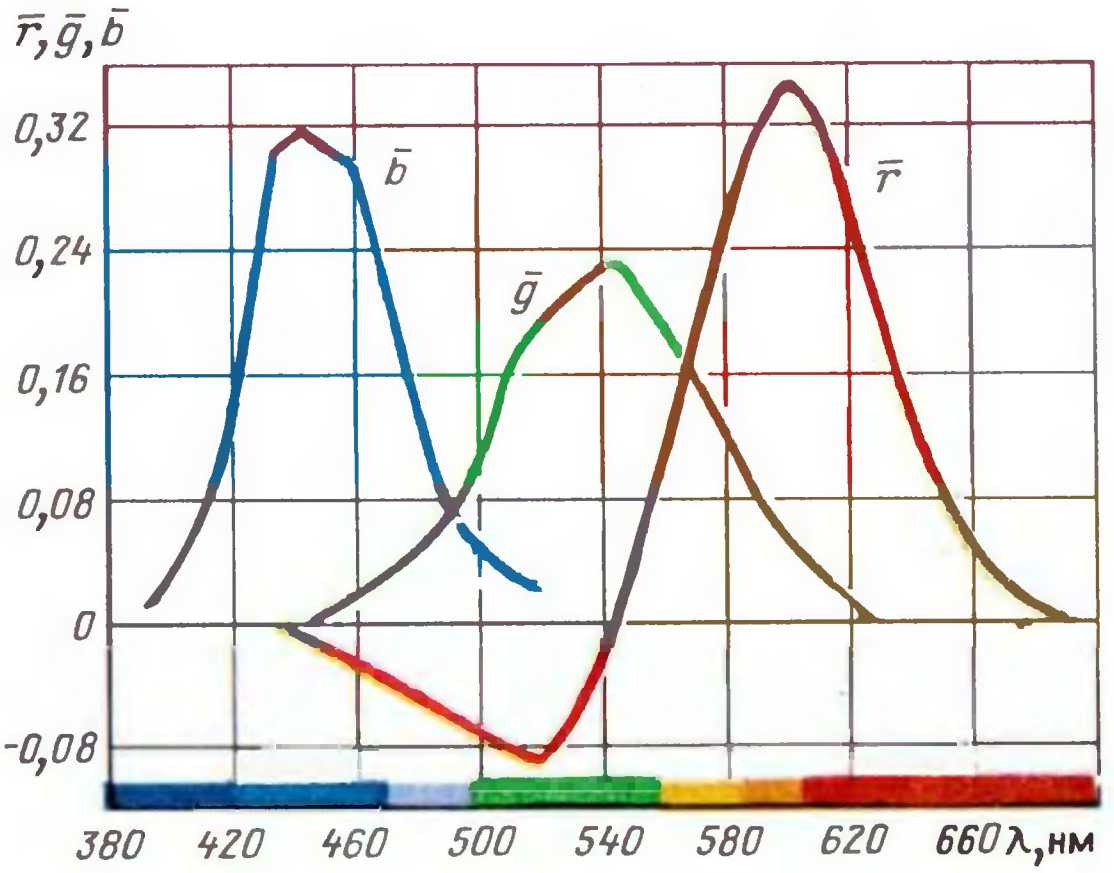


Рис. 2.35* Кривые удельных коэффициентов *r*, *g*, *b* стандартной системы RGB – кривые смешения МКО – 1931 г.

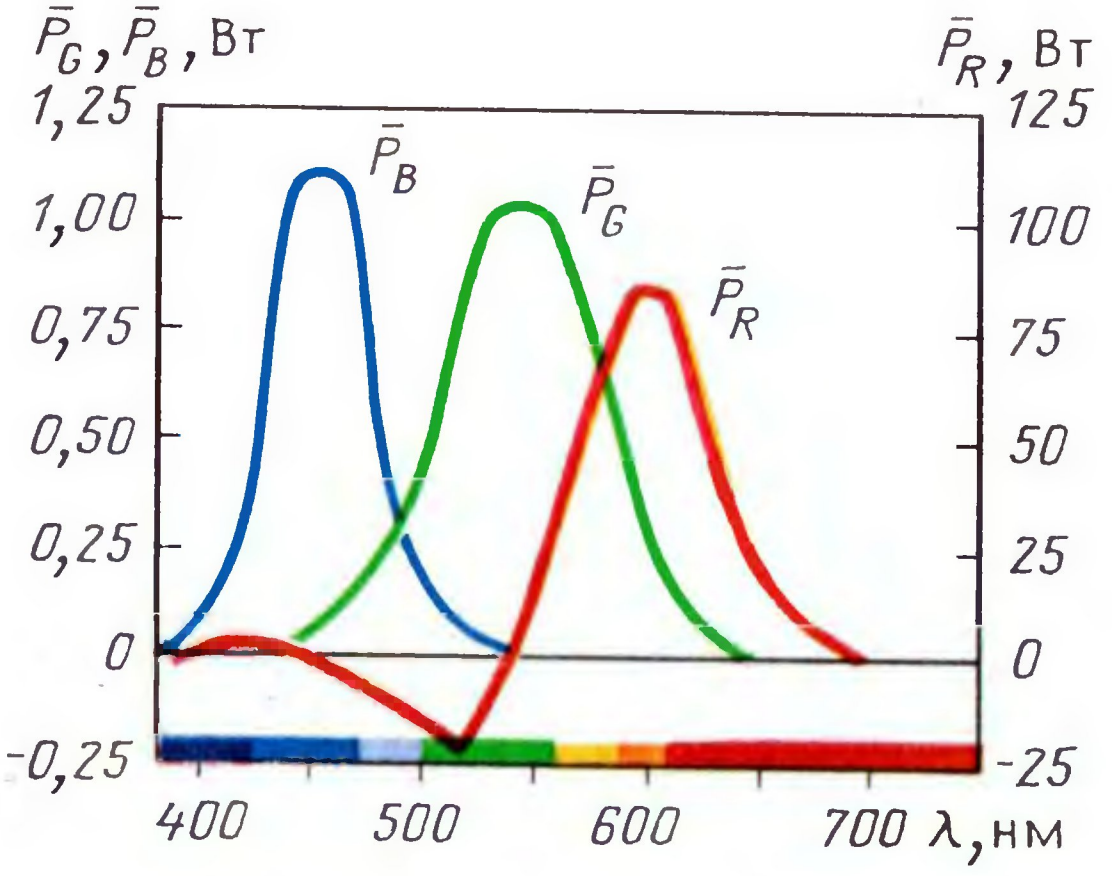


Рис. 2.36.* Зависимости мощностей основных цветов *R*, *G*, *B*, необходимых для согласования со спектральным цветом мощностью 1 Вт, от длины волн (мощность единичного количества основного цвета *R* = 243,9 Вт)

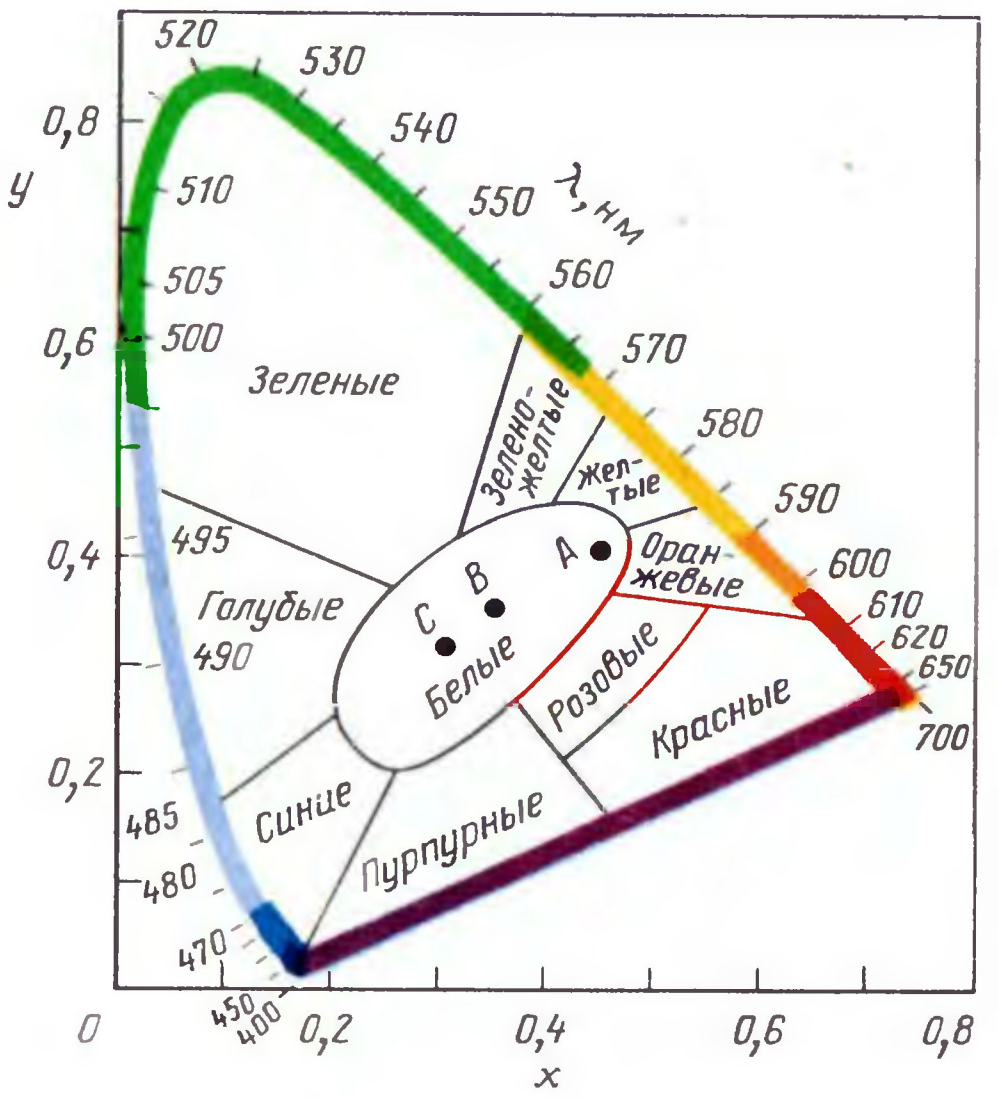


Рис. 2.44.* Спектральный локус и области цветов на диаграмме цветностей в системе *XYZ* МКО – 1931 г.

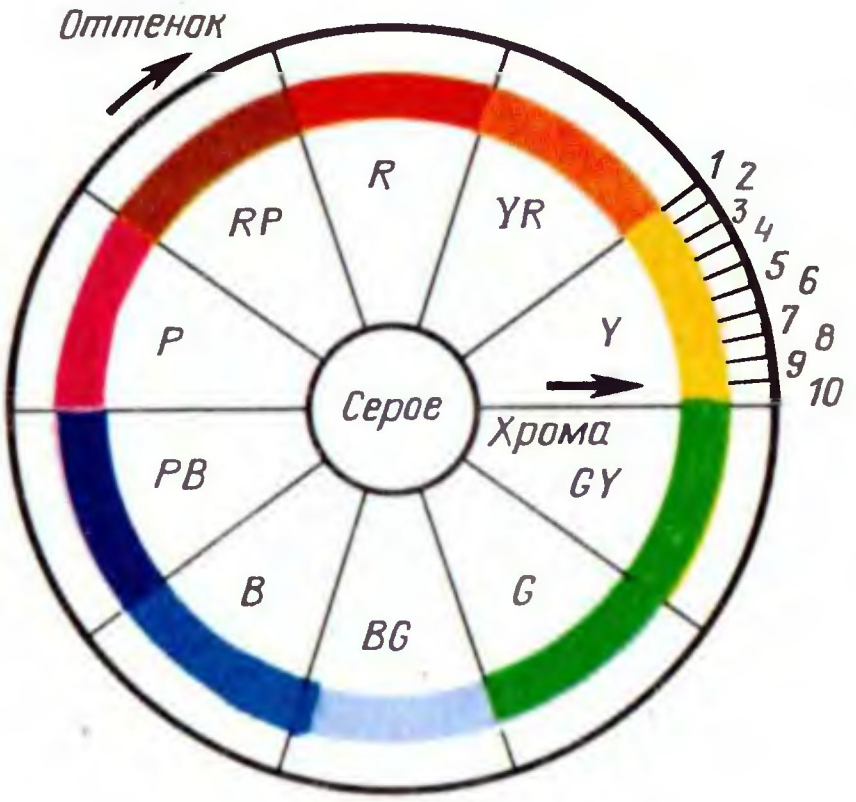


Рис. 2.76.* Цветовой круг Манселла

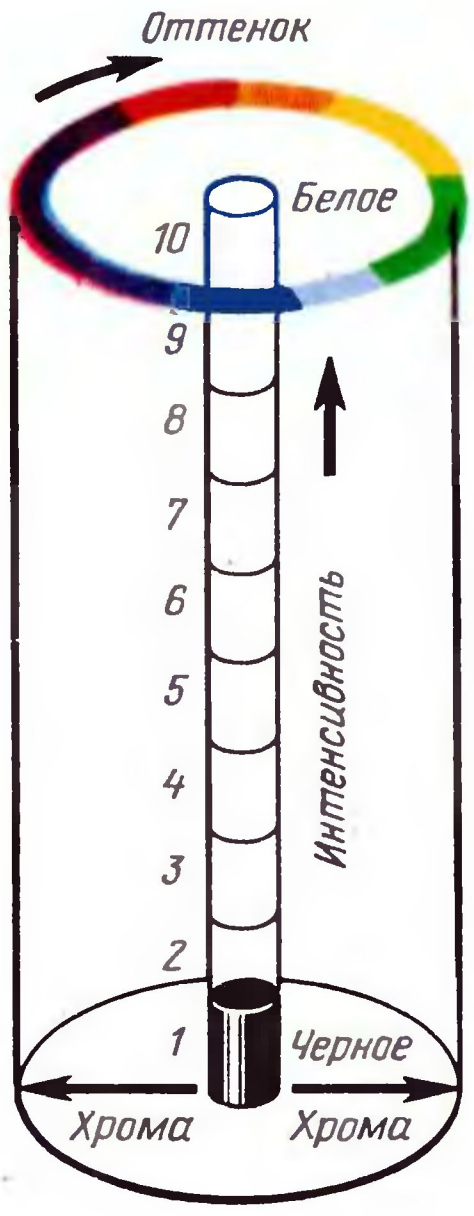


Рис. 2.77.* Идеальное цветовое тело по Манселлу

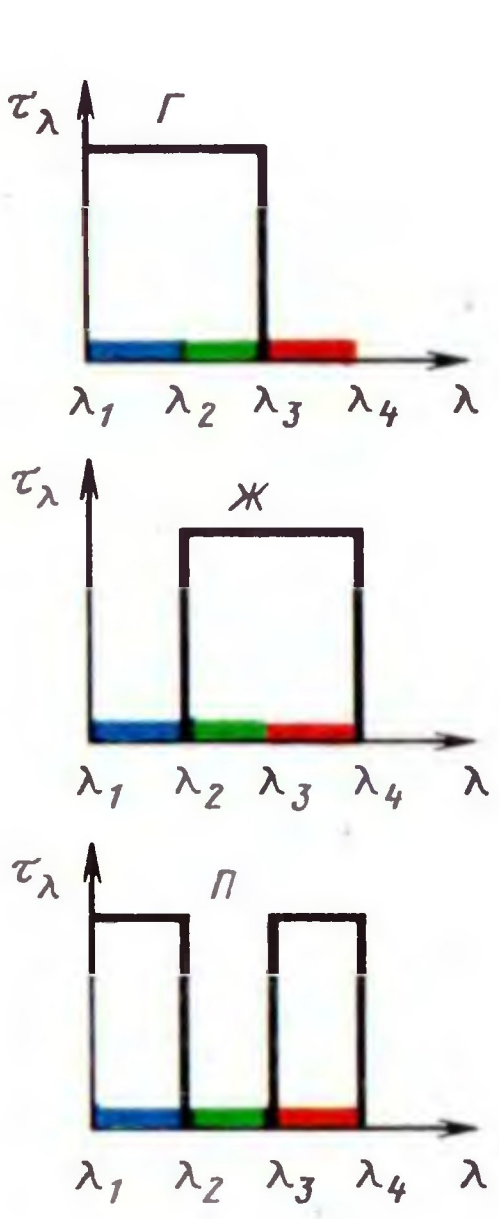


Рис. 2.78.* Идеализированные характеристики спектрального коэффициента пропускания трех основных субтрактивных светофильтров (Г — голубой, Ж — желтый, П — пурпурный)

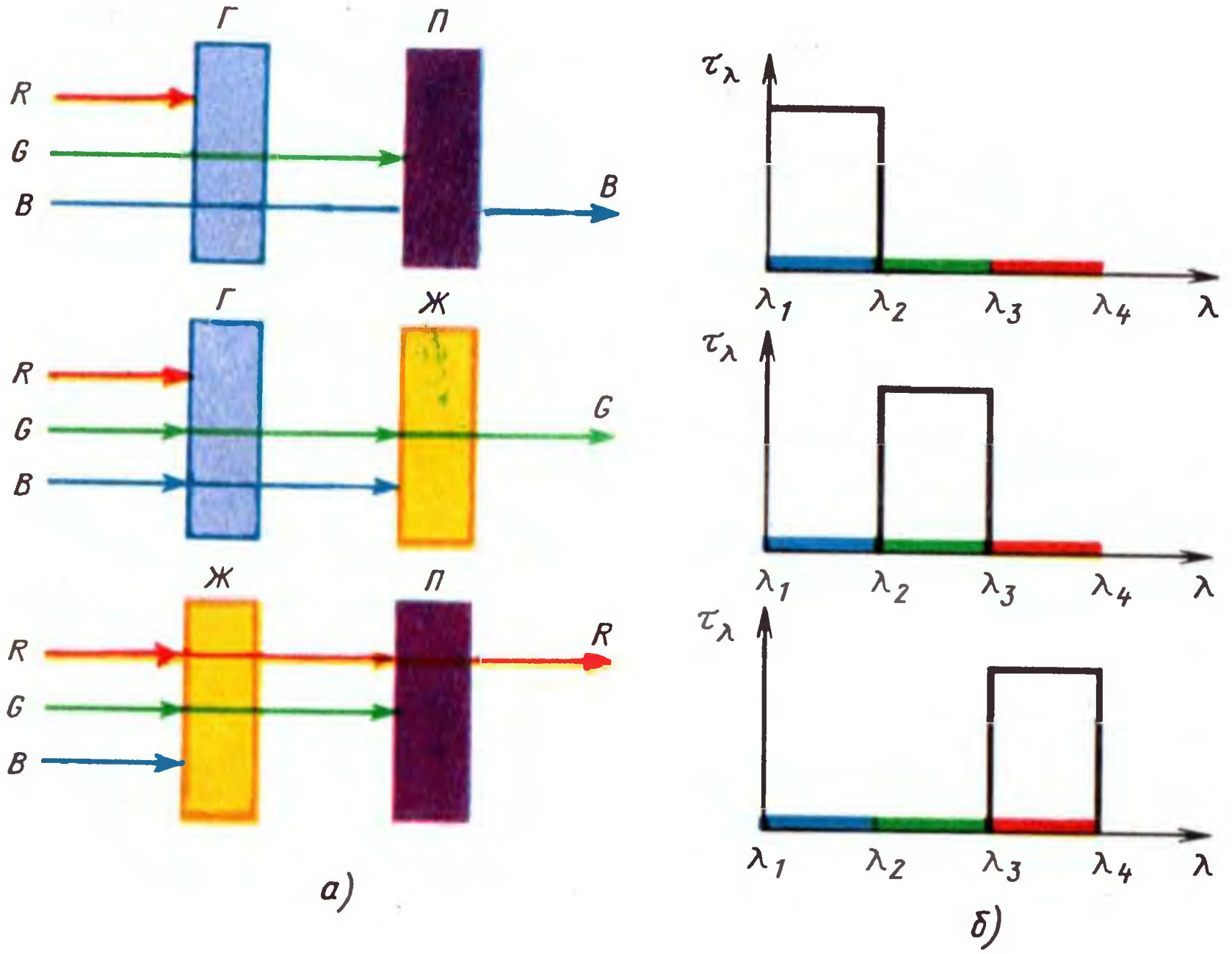


Рис. 2.79.* Характеристики спектрального коэффициента пропускания пар субтрактивных светофильтров и пояснение действия этих пар на поток белого света

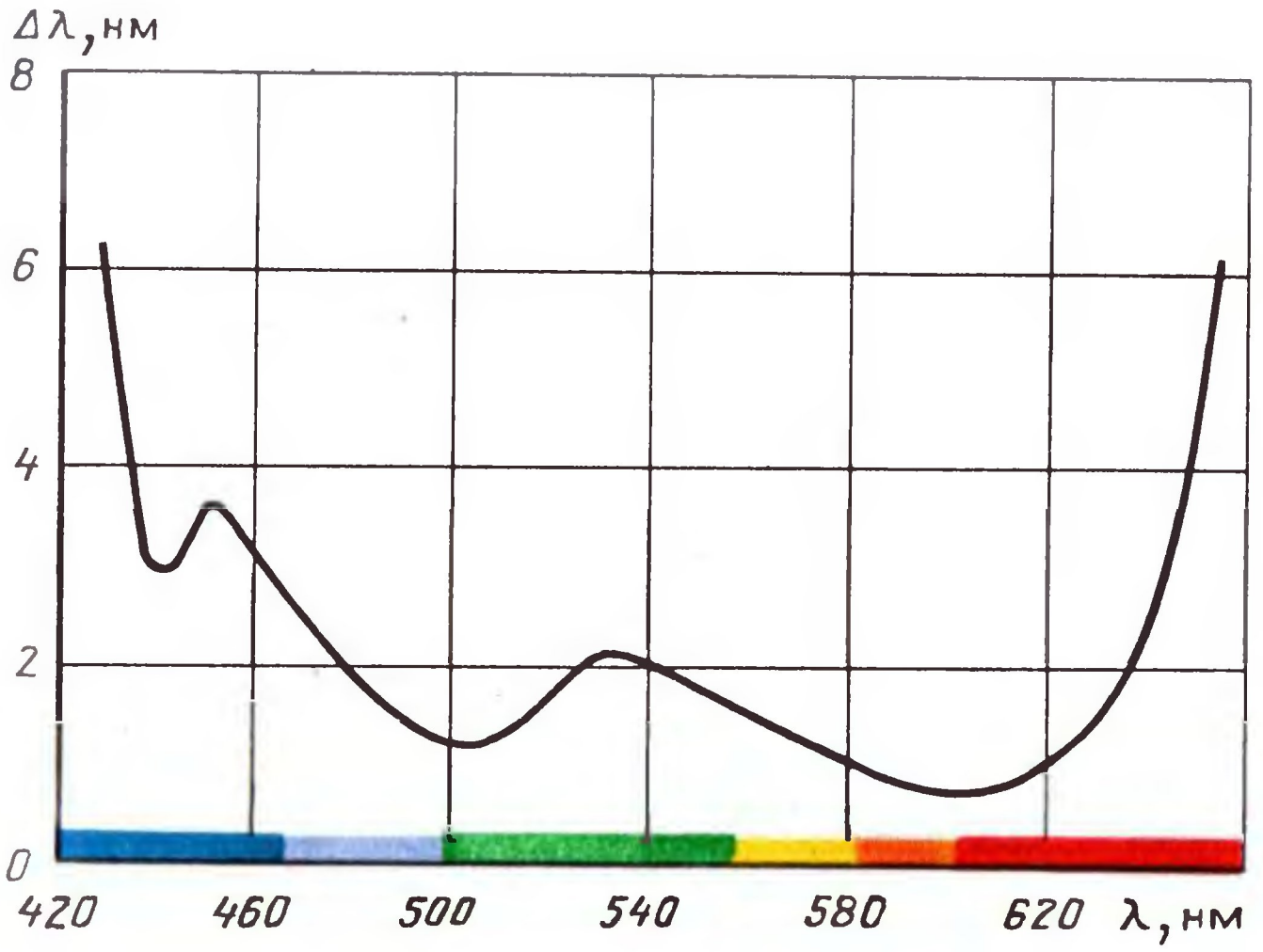


Рис. 3.1.* Зависимость различаемой глазом пороговой разности длины волны Δλ двух спектральных цветов от длины волны цветов (поле зрения 2°)

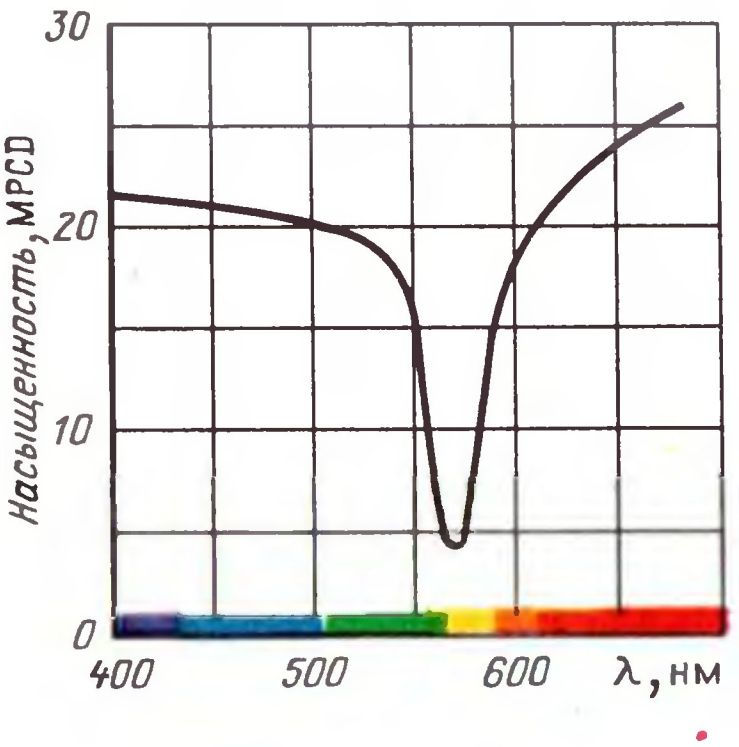


Рис. 3.2.* Зависимость насыщенности спектральных цветов от длины волны

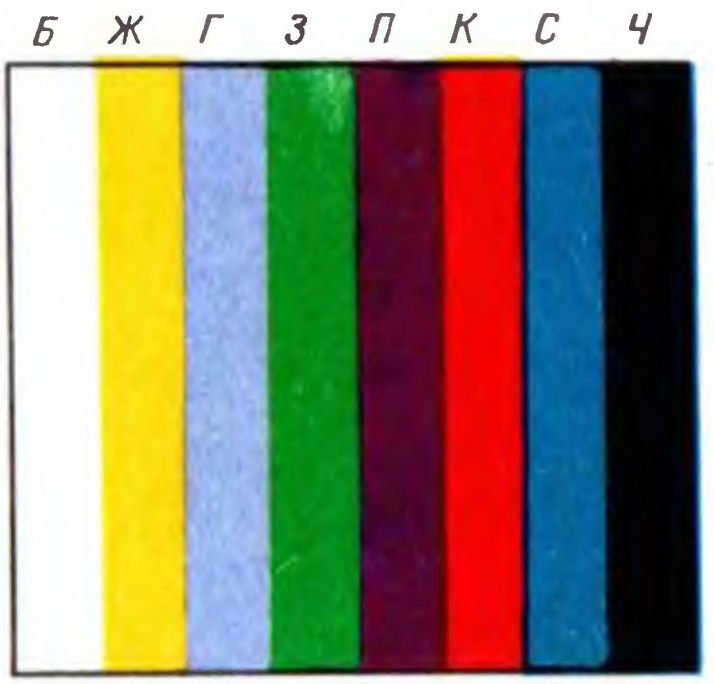


Рис. 4.27.* Изображение цветных полос максимальной насыщенности на экране цветного телевизора:
Б, Ж, Г, З, П, К, С, Ч – белый, желтый, голубой, зеленый, пурпурный, красный, синий, черный цвета

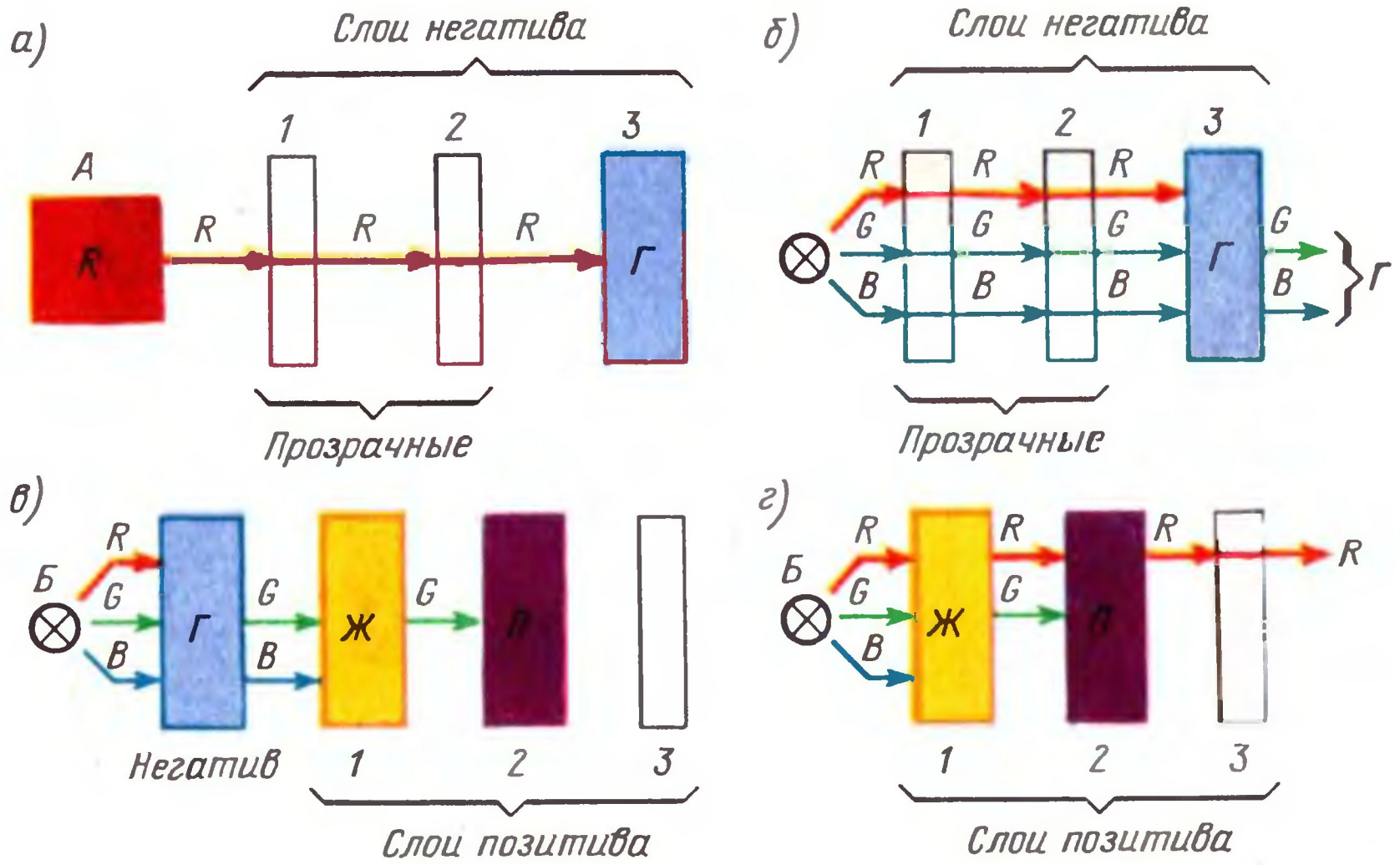


Рис. 5.6.* К пояснению образования цветов на негативной и позитивной кинолентах при красном цвете *R* первичного оригинала *А*:
а – образование негатива; *б* – цвет негатива при его освещении белым светом *Б*; *в* – образование позитива, *г* – цвет позитива при его освещении белым светом *Б*

Оригинал

Белый	Черный	Синий	Голубой	Зеленый	Желтый	Красный	Пурпурный

Негатив

Слои

1	Желтый		Желтый	Желтый				Желтый
1а								
2	Пурпурный			Пурпурный	Пурпурный	Пурпурный		
3	Голубой					Голубой	Голубой	Голубой

Цвет Негатива

Черный	Белый	Желтый	Красный	Пурпурный	Синий	Голубой	Зеленый

Цвет Позитива

Белый	Черный	Синий	Голубой	Зеленый	Желтый	Красный	Пурпурный

Рис. 5.7.* Цвета оригинала, негатива и позитива

Таблица 4.10

Цвет полос	E'_R	E'_G	E'_B	E'_Y	E'_{R-Y}	E'_{B-Y}
Белый	1	1	1	1	0	0
Желтый	1	1	0,256	0,915	0,085	—0,659
Голубой	0,256	1	1	0,778	—0,522	0,222
Зеленый	0,256	1	0,256	0,692	—0,436	—0,436
Пурпурный	1	0,256	1	0,564	0,436	0,436
Красный	1	0,256	0,256	0,478	0,522	—0,222
Синий	0,256	0,256	1	0,341	—0,085	0,659
Черный	0	0	0	0	0	0

100 %-ной амплитуде имеем $E'_R = E'_G = 1$ и $E'_B = 0$. Из (4.14) и (4.3) следует $E'_{R-Y} = 1 - \alpha - \beta = \delta$; $E'_{B-Y} = -\alpha - \beta = \delta - 1$, откуда $M = \delta/(\delta - 1)$. Для этого же цвета с насыщенностью менее 100 % имеем при 100 %-ной амплитуде $E'_R = E'_G = 1$ и $E'_B = E'_{мин}$ и аналогично получим для этого случая

$$E'_{R-Y} = 1 - \alpha - \beta - \delta E'_{мин} = \delta (1 - E'_{мин});$$

$$E'_{B-Y} = E'_{мин} (1 - \delta) - \alpha - \beta = (\delta - 1)(1 - E'_{мин}),$$

откуда $M = \delta (1 - E'_{мин})/[(\delta - 1)(1 - E'_{мин})] = \delta/(\delta - 1)$, т. е. величина M при изменении насыщенности не изменилась.

В сентябре 1971. г. Европейский Союз Радновещания рекомендовал применять значение $\gamma_к = 2{,}8$, формировать и рассчитывать испытательные сигналы (E'_Y и цветоразностные) для треугольника NTSC (см. табл. 3.4) при эталонном белом C. При этом на белом цвете D_{65} на входе кодера должно быть $E'_R = E'_G = E'_B$, а на его выходе цветоразностные сигналы должны при этом быть равны нулю. Спектральные характеристики передающей камеры было рекомендовано рассчитывать исходя из треугольника основных цветов приемника ЕС (см. табл. 3.4) при эталонном белом цвете D_{65}; в приемнике этот белый цвет должен создаваться, когда на выходе видеодетектора цветоразностные сигналы равны нулю, т. е. когда принимается только сигнал яркости (или сигналы черно-белого телевидения).

В [69, 70] рассмотрены вопросы создания испытательных сигналов.

Глава 5

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИЗОБРАЖЕНИЙ КИНОФИЛЬМОВ В ЦВЕТНОМ ТЕЛЕВИДЕНИИ

5.1. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЯРКОСТИ В ТЕЛЕВИЗИОННОМ ИЗОБРАЖЕНИИ КИНОФИЛЬМА

Общие сведения. Передача по телевидению изображений, записанных (сфотографированных) на киноленту (диапозитивы и кинофильмы), играет важную роль в практике телевидения. Киноленте имеет важное преимущество по сравнению с магнитной, состоящее в том, что изображение на ней не связано с телевизионным стандартом и поэтому пригодно для телевизионной передачи с любым стандартом развертки, что важно для международного обмена записанными на киноленту программами (фильмами). Недостатками киноленты являются сложность кинофотопроцесса, наличие вызванных этим процессом некоторых искажений цветопередачи в изображении на ней. Условимся называть *первичным оригиналом* сцену, которая предназначена для съемки на киноленту, а изображение этой сцены на киноленте — *вторичным оригиналом*. В телевидении приняты два подхода к передаче изображения кинофильмов для максимального приближения цвета изображения на экране кинескопа: а) к цвету вторичного оригинала; б) к цвету первичного оригинала. Прежде чем рассматривать эти вопросы, остановимся кратко на характеристиках воспроизведения цвета на киноленте [25, 71—75, 125].

Если E_0 — освещенность сцены, лк; t — длительность освещения кинопленки при съемке, с; $H = E_0 t$ — *количество освещения* (экспозиция), лк. с, где E_0 и t взаимозаменяемые величины, то под *спектральной чувствительностью кинопленки* понимают величину

$$S_\lambda = 1/H_{0\lambda}, \qquad (5.1)$$

где $H_{0\lambda}$ — экспозиция монохроматическим источником с длиной волны λ, создающая определенную оптическую плотность $D_\lambda = -\lg\tau_\lambda$ пленки в результате ее проявления. Диапазон экспозиций обычно составляет 10000:1 (диапазон оптических плотностей D от 4 до 0). Логарифмическая шкала для экспозиций близка к шкале светлоты, т. е. одинаковые разности логарифмов экспозиции воспроизводятся кинопленкой как одинаковые различия в светлоте.

Кинофотопроцесс подчинен *закону аддитивности*, который означает следующее: если световые потоки двух волн F_1 и F_2 подобраны по величине так, что при одинаковом времени экспозиции t_0 получают на кинопленке после проявки одинаковые оптические плотности от них, то сумма потоков $\alpha F_1 + \beta F_2$, где $\alpha + \beta = 1$, $(\alpha < 1; \beta < 1)$ создаст на кинопленке за время экспозиции t_0 ту же оптическую плотность

(*закон Ван-Кревельда*). Отсюда следует, что реакция фотоэмульсии на окрашенный свет есть сумма фотографического действия (т. е. оптических плотностей) света всех составляющих спектра этого света (произведения $P_\lambda S_\lambda$ складываются), различные кривые $P_\lambda = f(\lambda)$ могут создавать одинаковые оптические плотности киноленты.

Для неискаженного воспроизведения изменений яркости первичного оригинала имеем по аналогии с (3.11) $L_п = KL_0$, где L_0 — яркость этого оригинала; $L_п$ — яркость позитивного изображения на киноленте; обычно $K < 1$. Логарифмируя, получим

$$\lg L_п = \lg K + \lg L_0, \qquad (5.2)$$

где $\lg K < 0$. В системе логарифмических координат это прямая линия (рис 5.1).

Обычно зависимость (5.2) имеет только небольшой линейный участок. Эта зависимость обычно записывается в следующем виде:

$$D = K + \gamma \lg H \quad \lg (K_1 H^\gamma), \qquad (5.3)$$

где D — оптическая плотность изображения на киноленте из (2.335), γ — крутизна кривой градиент, представляющей эту зависимость, $K = \lg K_1$, где K и K_1 — постоянные коэффициенты. Эта кривая называется *характеристической*.

Для получения негативных и позитивных изображений применяется трехслойная кинопленка, а для получения позитива без негатива — цветная обратимая кинопленка.

На рис. 5.2 показаны характеристические кривые негативной, позитивной и обратимой кинопленок. Здесь $H_п$ — экспозиция негативной киноленты, создающая на ней оптическую плотность $D_п$, $D_п$ — оптическая плотность позитивной киноленты, созданная освещенным негативом с яркостью $L_п$; L_0 — яркость первичного оригинала; $\tau_п$ — коэффициент пропускания позитива; $Б_0$ и $Ч_0$ — освещенности первичного оригинала на белом и черном соответственно; $Б_п$ и $Ч_п$ и $Б_п$ и $Ч_п$ — яркости на белых и черных участках негатива и позитива соответственно. Протяженность линейного участка характеристической кривой по оси экспозиций называется *широтой этой кривой*. По аналогии с (5.3) напишем для кривой, показанной на рис. 5.2,*а*:

$$D_п \quad \lg \tau_д - \lg \tau_п^{-1} = K +$$
$$- \gamma_п \lg H_п \quad \lg (K_1 H_п^{\gamma_п}), \qquad (5.4)$$

где $\tau_п$ — пропускание негатива, $\gamma_п$ — крутизна характеристической кривой негатива.

Отсюда получим $\tau_п = K_1^{-1} H_п^{\gamma_п}$. Для яркости проявленного и ос-

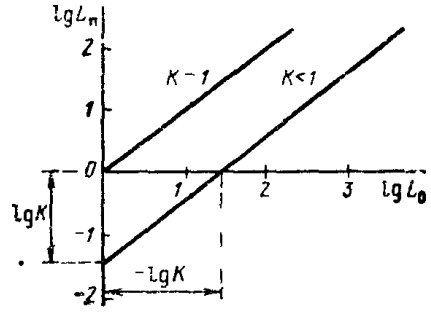


Рис. 5.1. Условия правильного воспроизведения в кинофильме изменений яркости передаваемой сцены

вещенного (на просвет) негатива с изображением получаем $L_и = K_н \tau_н$, где $K_н$ — постоянный коэффициент, учитывающий яркость источника света (как показано на рис. 5.3, *а*). Подставив сюда полученное выше выражение для $\tau_н$, имеем $L_и = K_и K_1^{-1} H_и^{-\gamma_н}$. Но $H_н = E_и t = A_1 L_0$ при заданном времени освещения кинопленки t, где $E_и$ — освещенность на негативной кинопленке, A_1 — постоянный множитель. Так как $E_и$ пропорциональна яркости L_0, то получим

$$L_и = A_2 L_0^{-\gamma_н}, \tag{5.5}$$

где $A_2 = \text{const}$.

Теперь рассмотрим позитив, экспозиция которого через освещенный негатив с пропусканием $\tau_н$ равна $H_и$ (см. рис. 5.3, *а*), где $H_п = K_2 \tau_и$. По аналогии с (5.3) имеем $D_п = K + \gamma_п \lg H_п = K + \gamma_п \lg \times (K_2 \tau_и) = K + \gamma_п \lg K_2 + \gamma_п \lg \tau_н = a + \gamma_п (-D_н)$, где $a = K + \gamma_п \lg K_2$: $\lg \tau_н = -D_н$, $\gamma_п$ — крутизна характеристической кривой позитивной кинопленки. Следовательно,

$$D_п = a - \gamma_п D_н. \tag{5.6}$$

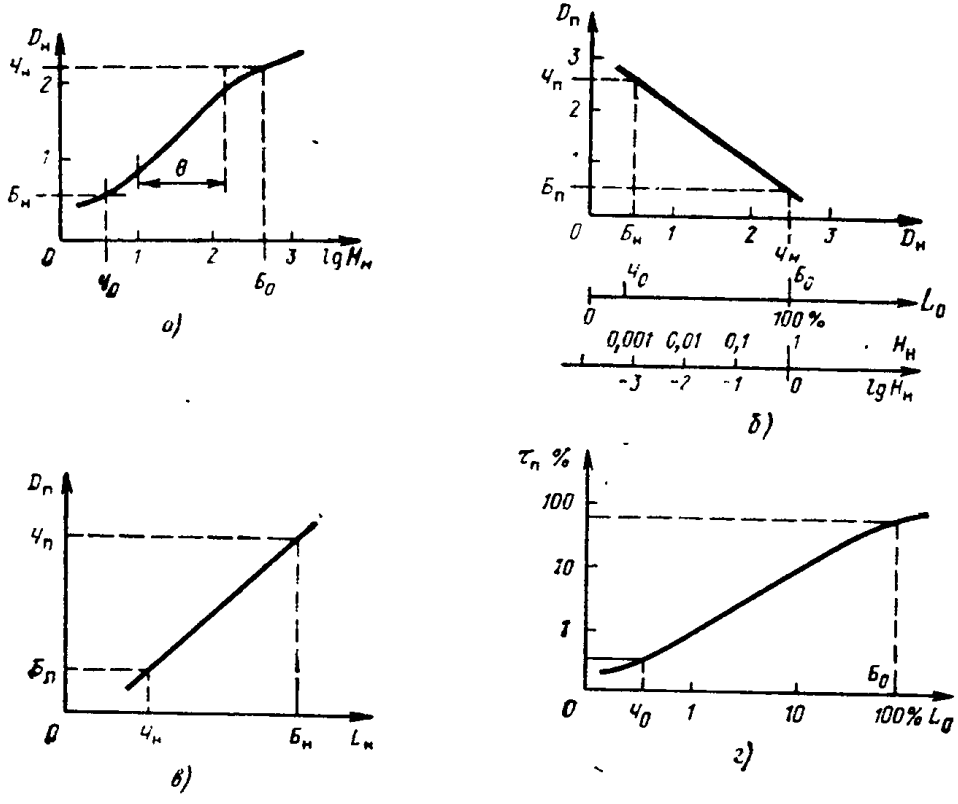


Рис. 5.2. Характеристические кривые кинолеиты:
а — негативная кинолента; *б, в, г* — позитивная кинолента

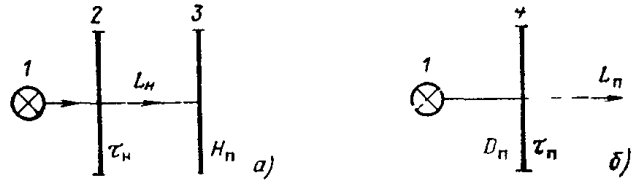


Рис. 5.3. Получение позитива из негатива: здесь: 1 — источник света; 2 — проявленный негатив; 3 — чувствительная кинопленка; 4 — проявленный позитив

Подставив (5.4) в (5.6), получим $D_н = a - \gamma_н (K - \gamma_н \lg H_н) = a - \gamma_п K - \gamma_н \gamma_н \lg H_н = a_1 - \gamma_н \gamma_н \lg H_н$, где $a_1 = a - \gamma_п K$. Таким образом,

$$D_н = a_1 - \gamma_н \gamma_н \lg H_н, \tag{5.7}$$

но $D_н = -\lg \tau_н$; $D_н = -\lg \tau_н$. Подставим эти выражения в (5.6) и получим $-\lg \tau_п = a - \gamma_н (-\lg \tau_н) = a - \gamma_н \lg \tau_н^{-1} = a - \lg \tau_и^{\gamma_н} = -\lg (A_3 \tau_и^{\gamma_н})$. Отсюда следует

$$\tau_н = A_3 \tau_и^{\gamma_п}, \tag{5.8}$$

где $A_3 = \text{const}$.

Полученное выше выражение $H_н = A_1 L_0$ подставим в выражение для $\tau_н = K_1^{-1} H_н^{-\gamma_н}$ и получим

$$\tau_н = K_1^{-1} (A_1 L_0)^{-\gamma_н} = A_4 L_0^{-\gamma_н}, \tag{5.9}$$

где $A_4 = \text{const}$. Подставив (5.9) в (5.8), получим

$$\tau_н = A_3 (A_4 L_0^{-\gamma_н})^{\gamma_п} = A_5 L_0^{-\gamma_н \gamma_п}, \tag{5.10}$$

где $A_5 = \text{const}$.

Яркость проявленного позитивного изображения на кинопленке (рис. 5.3. *б*), освещаемой (на просвет) источником света,

$$L_п = K_п \tau_п, \tag{5.11}$$

где $K_п = \text{const}$ (учитывает яркость источника света). Подставив сюда (5.10), получим

$$L_п = A_6 L_0^{-\gamma_н \gamma_п}, \tag{5.12}$$

где $A_6 = K_п A_5 = \text{const}$. Для неискаженного воспроизведения изменений яркости необходимо соблюдать в кинофотопроцессе условие

$$\gamma_и \gamma_п = 1. \tag{5.13}$$

Гамма-коррекция при телевизионной передаче изображения позитивного кинофильма. В этом случае по аналогии с (3.12) с учетом (5.11) яркость изображения на экране кинескопа приемника

$$L_и = A_7 L_п^{\Gamma} = A_7 (K_п \tau_п)^{\Gamma} = A_8 \tau_п^{\Gamma}, \tag{5.14}$$

где $A_7 = \text{const}$; $A_8 = \text{const}$. Из (3.14) имеем $\Gamma = \gamma_{\text{п.т}}\gamma_{\text{гк}}^{-1}\gamma_{\text{к}}$, где $\gamma_{\text{гк}} > 1$. Для камеры на видиконе имеем $\gamma_{\text{п.т}} = 0{,}65$; для камеры с бегущим лучом $\gamma_{\text{п.т}} = 1$. В цветном телевидении $\gamma_{\text{к}} = 2{,}8$ (коэффициент нелинейности модуляционной характеристики кинескопа). Подставив (5.10) в (5.14), получим

$$L_{\text{и}} = A_8 \left(A_5 L_{\text{о}}^{\gamma_{\text{н}}\gamma_{\text{п}}}\right)^{\Gamma} = A_9 L_{\text{о}}^{\gamma_{\text{н}}\gamma_{\text{п}}\Gamma}. \tag{5.15}$$

Отсюда следует, что с помощью гамма-корректора можно получить $\gamma_{\text{н}}\gamma_{\text{п}}\Gamma = 1$ и $L_{\text{и}} = A_9 L_{\text{о}}$, если

$$\gamma_{\text{н}}\gamma_{\text{п}}\Gamma = \gamma_{\text{н}}\gamma_{\text{п}}\gamma_{\text{п.т}}\gamma_{\text{гк}}^{-1}\gamma_{\text{к}} = 1. \tag{5.16}$$

В этом случае (т. е. при $\gamma_{\text{гк}} = \gamma_{\text{н}}\gamma_{\text{п}}\gamma_{\text{п.т}}\gamma_{\text{н}}$) в изображении на экране кинескопа будут правильно воспроизводиться изменения (градации) яркости первичного оригинала. А при выполнении условия $\Gamma = \gamma_{\text{п.т}} \times \times\gamma_{\text{гк}}^{-1}\gamma_{\text{к}} = 1$, как это следует из (3.14), на экране кинескопа будут правильно воспроизводиться изменения (градации) яркости, имеющиеся в изображении на позитивной киноленте.

При $\gamma_{\text{п.т}} = 1$ на выходе телевизионной камеры, с учетом (5.10) и выражения $H_{\text{п}} = A_1 L_{\text{о}}$, приведенного выше, видеосигнал

$$E = A_{10}\tau_{\text{п}} = A_{11} L_{\text{о}}^{\gamma_{\text{н}}\gamma_{\text{п}}} - A_{12} H_{\text{и}}^{\gamma_{\text{н}}\gamma_{\text{п}}}, \tag{5.17}$$

где $A_{10} = \text{const}$; $A_{11} = \text{const}$; $A_{12} = \text{const}$.

Влияние контрастности на цветопередачу. Из (5.14) имеем для контрастности изображения на экране цветного кинескопа, полученного при передаче изображения с цветной позитивной киноленты:

$$C_{\text{к}} = L_{\text{и.макс}}/L_{\text{и.мин}} = (\tau_{\text{п.макс}}/\tau_{\text{п.мин}})^{\Gamma} = C_{\text{ф}}^{\Gamma}, \tag{5.18}$$

где $C_{\text{ф}} = (\tau_{\text{п.макс}}/\tau_{\text{п.мин}})$ — контрастность изображения на позитивной цветной киноленте (фильме). Отсюда имеем $\Gamma = (\lg C_{\text{к}}/\lg C_{\text{ф}})$. При выполнении с помощью гамма-корректора условия $\Gamma = 1$ необходимо также иметь $C_{\text{к}} = C_{\text{ф}}$. Однако обычно $C_{\text{к}} < C_{\text{ф}}$, что ведет к искажениям цветопередачи в изображении на экране кинескопа по сравнению с изображением на позитивной киноленте.

С другой стороны, из (5.15) имеем для контрастности изображения на экране цветного кинескопа, полученного при передаче изображения с цветной позитивной киноленты

$$C_{\text{к}} = L_{\text{и.макс}}/L_{\text{и.мин}} = (L_{\text{о.макс}}/L_{\text{о.мин}})^{\gamma_{\text{н}}\gamma_{\text{п}}\Gamma} = C_{\text{о}}^{\gamma_{\text{н}}\gamma_{\text{п}}\Gamma}, \tag{5.19}$$

где $C_{\text{о}} = (L_{\text{о.макс}}/L_{\text{о.мин}})$ — контрастность первичного оригинала.

При выполнении с помощью гамма-корректора условия $\gamma_{\text{н}}\gamma_{\text{п}}\Gamma = 1$ из (5.16) необходимо также иметь $C_{\text{к}} = C_{\text{о}}$. Но обычно $C_{\text{к}} < C_{\text{о}}$, что ведет к искажениям цветопередачи по сравнению с первичным оригиналом.

Телевизионное преобразование черно-белого негатива в позитив. Для экономии времени, материалов и снижения искажений, которые

может внести в изображение кинофотопроцесс, в телевидении можно получить на экране кинескопа позитивное изображение (черно-белого или цветного) первичного оригинала при использовании в передающей камере негативного кинофильма. Для этого необходимо применять *отрицательный гамма-корректор*.

По аналогии с (5.14) имеем яркость изображения на экране кинескопа $L_и = A_{13} L_н^{\Gamma}$, где $\Gamma = \gamma_{п.т}\gamma_{гк}^{-1}\gamma_к$; $\gamma_{гк} > 1$; $A_{13} = \text{const}$. Подставим сюда (5.5) и получим

$$L_и = A_{13}\left(A_2 L_о^{-\gamma_н}\right)^{\Gamma} = A_{14} L_о^{-\gamma_н\Gamma} =$$

$$= A_{14} L_о^{-\gamma_н\gamma_{п.г}\gamma_{гк}^{-1}\gamma_к} = A_{14} L_о^{\Gamma_1}, \qquad (5.20)$$

$$\Gamma_1 = -\gamma_н\gamma_{п.т}\gamma_{гк}^{-1}\gamma_к. \qquad (5.21)$$

Для получения в рассматриваемом случае позитивного изображения на экране кинескопа необходимо, чтобы с ростом $L_о$ увеличивалась $L_и$, и наоборот, а для этого должно быть $\Gamma_1 > 0$, т. е.

$$-\gamma_и\gamma_{п.т}\gamma_{гк}^{-1}\gamma_к > 0, \qquad (5.22)$$

что возможно, если $\gamma_{гк}^{-1} < 0$, так как $\gamma_н > 0$; $\gamma_{п.т} > 0$; $\gamma_к > 0$. Таким образом, должно соблюдаться условие $\Gamma_1 = 1$, т. е.

$$\gamma_{гк} = -\gamma_и\gamma_{п.т}\gamma_к. \qquad (5.23)$$

Пример. Дано $\gamma_н = 1{,}5$; $\gamma_{п.г} = 0.67$ (видикон), $\gamma_к = 2{,}8$.
Из (5.23) получим $\gamma_{гк} = -2{,}8$. Сигнал на выходе гамма-корректора $E_{вых} = E_{вх}^{1/\gamma_{гк}}$, где $E_{вх}$ — сигнал на его входе. В нашем случае $1/\gamma_{гк} = -1/2{,}8 = -0{,}36$. Отсюда $E_{вых} = E_{вх}^{-0{,}36}$. Если $\gamma_{гк} = -2$, то $1/\gamma_{гк} = -1/2 = -0{,}5$ и $E_{вых} = E_{вх}^{-0{,}5} = 1/\sqrt{E_{вх}}$. На рис. 5.4 показана характеристика такого (отрицательного) гамма-корректора.

В табл. 5.1 приведены результаты расчета яркости позитивного изображения $L_и$ на экране кинескопа при передаче изображения серой шкалы с негативной киноленты. При этом применены формулы: (5.9) для $\tau_н$; (5.5) для $L_н$; $E = L_н^{\gamma_{п.т}}$ для напряжения сигнала; $E' = E^{1/\gamma_{гк}}$, аналогичная (3.28) для сигнала на выходе гамма-корректора; $L_и = (E')^{\gamma_к}$ — для яркости позитивного изображения. Все постоянные коэффициенты в этих формулах взяты для простоты равными единице, яркости и напряжения сигналов взяты в относительных величинах, градиенты $\gamma_н = 1{,}5$;

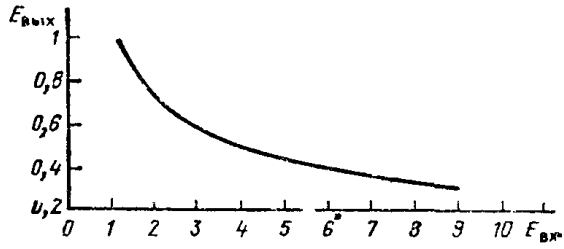


Рис. 5.4. Амплитудная характеристика *отрицательного гамма-корректора* ($\gamma_{гк} = -0{,}5$), для которого $E_{вых} = 1/\sqrt{E_{вх}}$

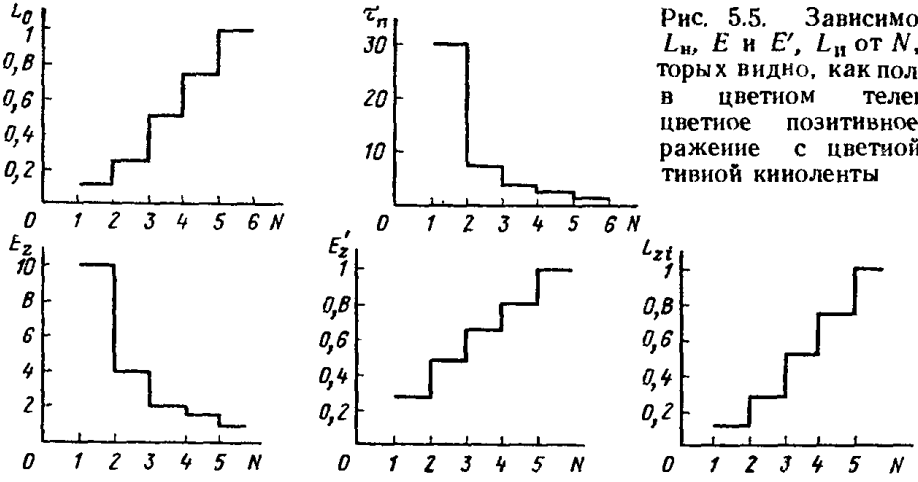


Рис. 5.5. Зависимости L_0, $L_н$, E и E', $L_и$ от N, из которых видно, как получается в цветном телевидении цветное позитивное изображение с цветной негативной кинопленки

$\gamma_{п\,т} = 0{,}67$; $\gamma_{гк}$ — 2; $\gamma_к$ 2, так что из (5.21) имеем Γ_1 — — $-\gamma_н\gamma_{н.т}\gamma_{гк}^{-1}\gamma_к$ —1,5·0,67· (—2)·2 1 (N — номер градации шкалы).

Таблица 5.1

Номер отсчета N	L_0	$\tau_н$ $L_0^{-1,5}$	$L_и$ $\tau_н$	$E=L_н^{0,67}$	$E'=E^{-0,5}$	$L_и=(E')^2$	$L_и/L_0$
1	0,10	32,00	32,00	10,00	0,32	0,10	1
2	0,25	8,10	8,10	4,00	0,50	0,25	1
3	0,50	2,86	2,86	2,00	0,71	0,50	1
4	0,75	1,56	1,56	1,34	0,86	0,75	1
5	1	1	1	1	1	1	1

На рис. 5.5 построены зависимости L_0, $L_н$, E, E', $L_и$, из которых видно, что яркость изображения на экране кинескопа повторяет L_0 (так как отношение $L_и/L_0$ остается неизменным для всех значений L_0), т. е. на экране кинескопа получено позитивное изображение первичного оригинала без искажений яркости.

5.2. ЦВЕТ НА КИНОЛЕНТЕ

Общие положения. Фотоэмульсия черно-белой кинопленки состоит из кристаллов светочувствительного вещества (галоидного серебро-бромистого с примесью йодистого или хлористого), суспендированного в желатине, с добавлением сенсибилизаторов для увеличения чувствительности в красной части спектра. Под действием света кристаллы галоидного серебра становятся чувствительными к проявителю — при проявлении восстанавливается металлическое серебро на тех участках эмульсии, которые освещались, и делает эти участки

темными (негатив), а неразложившееся галоидное серебро растворяется при фиксировании гипосульфитом и удаляется промывкой, и эмульсия на этих участках становится прозрачной (это черные участки в первичном оригинале).

В цветной фотографии при съемке на кинопленку используется не аддитивное, а субтрактивное воспроизведение цвета, для чего производят цветоделение, т. е. разделяют световой поток от первичного оригинала на три составляющие, воздействующие на три слоя фотоэмульсии с различными спектральными характеристиками чувствительности.

Трехслойная кинопленка применяется для получения как негатива, так и позитива. Эти слои содержат наряду с галоидным серебром еще и красители. При проявлении такой пленки совместно с изображением из серебра образуются изображения из красителей на тех участках, которые поглотили энергию света. При отбеливании (обычно в растворе красной кровяной соли) и фиксировании серебро удаляется и на пленке остаются только изображения из красителей с различной концентрацией (оптической плотностью). Изображения из красителей образуются в процессе реакции между продуктами окисления проявителя, которые создаются при восстановлении галоидного серебра в металлическое, и специальными бесцветными веществами, содержащимися в фотоэмульсии.

Первый слой содержит желтый краситель *Ж*, второй слой — пурпурный *П*, третий — голубой *Г*. Они образуют три основных субтрактивных цвета — *Ж*, *П*, *Г*. Каждый слой чувствителен к той части спектра, которая поглощается красителем этого слоя (т. е. поглощается цвет, дополнительный к цвету, пропущенному слоем). Желтый краситель поглощает синий цвет, пурпурный поглощает зеленый цвет, голубой поглощает красный цвет. Краситель пропускает только те составляющие спектра падающего на него света, аддитивная смесь которых образует *цвет красителя*. Это поясняется в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Слой	Выделяемый краситель	Цвет	
		поглощаемый красителем	пропускаемый красителем
1	*Ж*	*B*	*R* и *G*
2	*П*	*G*	*B* и *R*
3	*Г*	*R*	*B* и *G*

Из этой таблицы следует, что краситель *Ж* выделяется синим цветом, краситель *П* — зеленым, краситель *Г* — красным.

В § 2.25 было рассмотрено субтрактивное смешение цветов и спектральные характеристики идеальных красителей *Г*, *Ж* и *П* (см. на рис. 2.78), а действие последовательных пар таких красителей показано на рис. 2.79.

На рис. 5.6* показано в качестве примера, как образуются цвета на негативной и позитивной кинолентах при красном цвете R первичного оригинала, обозначенного буквой A (см. рис. 5.6, *а*). На рис. 5.6, *б* и *в* источник белого света $Б$ освещает негатив, на рис. 5.6, *г*, этот источник освещает позитив. На рис 5.6, *а* и *б* слои *1* и *2* — прозрачные (красители не выделились), слой *3* поглотил красную часть спектра и стал голубым (т. е. дополнительным к цвету первичного оригинала). На рис. 5.6, *в* зеленая и синяя части спектра света от источника $Б$, пройдя через негатив, экспонируют позитивную кинопленку (красная часть спектра через голубой негатив не проходит), в ее слое *1* выделяется краситель $Ж$ (поглощается синяя часть спектра), в ее слое *2* поглощается зеленая часть спектра, вышедшего из слоя *1*, и в слое *2* выделяется пурпурный краситель, слой *3* остается прозрачным. На рис. 5.6, *г* красная часть спектра от источника $Б$ проходит через все три слоя позитива, зеленая часть проходит через слой *1* и поглощается красителем $П$ слоя *2*, синяя часть поглощается в слое *1*. В результате позитив имеет красный цвет, как и первичный оригинал. На рис. 5.7* показаны цвета негатива и позитива для разных цветов первичного оригинала, полученные аналогично рис. 5.6. Тиражирование позитивов делается с копий негативов (контратипов). Характеристическая кривая цветной обратимой кинопленки показана на рис. 5.8 (здесь $\gamma < 0$ и обычно $\gamma \approx -1{,}5$).

Под *эквивалентной нейтральной* (эффективной) плотностью $D_э$ красителей $Ж$, $П$, $Г$ понимается оптическая плотность пленки с изображением серого (нейтрального по цвету) поля, образуемого добавлением к данному красителю двух других в таких количествах, чтобы образовалось такое поле. Если оптическая плотность поля равна 1, то условно принимаются $D_{эЖ} = 1$, $D_{эП} = 1$, $D_{эГ} = 1$. Оптические плотности трех слоев пленки, измеренные в таких единицах, должны сохраняться равными друг другу при изменении экспозиции в рабочих пределах (это баланс слоев по чувствительности). Нарушение баланса (особенно на темном и максимально светлом при большой контрастности) приводит к нелинейным искажениям цвета, для уменьшения которых при печати позитива с помощью копировальных фильтров подбирают спектральный состав источника света.

Если характеристики слоев $D = f(H)$ не параллельны, то нарушен баланс слоев по контрастности и исправление баланса копировальными фильтрами на малых экспозициях ведет к искажениям цвета при больших экспозициях.

Искажения цвета в кинофильме, вызванные вредными (побочными) поглощениями света в красителях негативной и позитивной кинопленок. На рис. 5.9 даны реальные спектральные характеристики чувствительности слоев кинопленки и оптические плотности красителей этих слоев. Из рисунка видно, что форма характеристик реальных красителей отличается от прямоугольной и имеются области взаимного перекрытия характеристик. Для негативных и позитивных кинопленок такие характеристики примерно одинаковы.

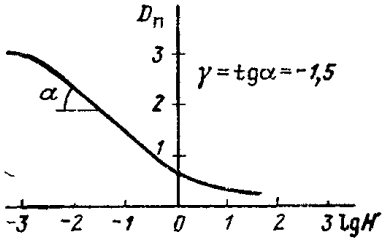


Рис. 5.8. Характеристическая кривая обратимой цветной кинопленки (позитивного изображения на ней):
Н — экспозиция

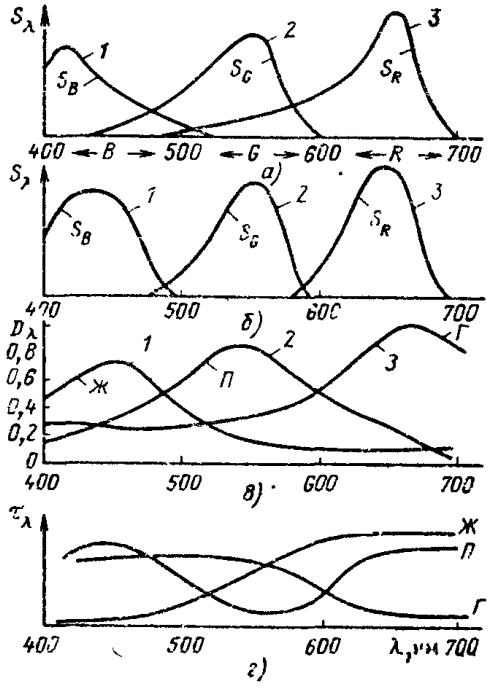


Рис. 5.9. Зависимости от длины волны чувствительности S_λ, оптической плотности D_λ, спектрального коэффициента пропускания τ_λ слоев кинопленок:
а — негативной; *б* — позитивной; *в* и *г* — негативной или позитивной

Взаимное перекрытие спектральных характеристик приводит к искажениям цветопередачи. Например, характеристика D_λ пурпурного красителя создает во втором слое значительное вредное поглощение синей и красной частей спектра; характеристика D_λ желтого красителя создает в первом слое значительное вредное поглощение зеленой и красной частей спектра; характеристика D_λ голубого красителя создает в третьем слое вредное поглощение синей и зеленой частей спектра. Например, при съемке синего первичного оригинала негативная кинопленка поглощает синюю часть спектра не только в слое *1* (в котором выделяется краситель *Ж*), но и в слоях *2* и *3* (в которых выделяются красители *П* и *Г*), и в результате в негативе появляются вредные пурпурное и голубое изображения. При изготовлении позитива такой негатив освещается белым светом и через него на позитивную кинопленку проходит полезный желтый свет и вредный синий (см. рис. 2.79, через слои *П* и *Г* проходит синий свет), создающий на позитивной кинопленке вредное желтое изображение в дополнение к правильному синему, и поэтому насыщенность и яркость синего цвета в позитиве снизятся и его цветовой тон сдвинется в сторону вредных цветов (одного или другого). В табл. 5.3 это поясняется для ряда цветов первичного оригинала и показано, какими красителями на кинопленке создаются правильные и вредные цвета. Эти искажения можно уменьшить, применяя цветокоррекцию с помощью маски, под которой понимается малоконтрастный цветной позитив, имеющий цвета, дополнительные к вредному цвету на основном позитиве. Маска накладывается на негатив, и через нее печа-

Таблица 5.3

Цвет первичного оригинала	Цвет и красители негатива				Цвета и красители позитива			
	Правильный		Вредный		Правильный		Вредный	
	Цвет	Красители	Цвет	Красители	Цвет	Красители	Цвет	Красители
B	Ж	Ж	П и Г	П и Г	B	Г и П	Ж	Ж
G	П	П	Ж и Г	Ж и Г	G	Ж и Г	П	П
R	Г	Г	Ж и П	Ж и П	R	П и Ж	Г	Г
Ж	B	Г и П	Ж	Ж	Ж	Ж	B	Г и П

тается позитив. Недостаточная широта цветных кинопленок (не более 2, а у черно-белых до 5) ограничивает такую цветокоррекцию.

Для кинопленок дневного света источник освещения первичного оригинала должен иметь цветовую температуру $T_c = 5000$ К, а для пленок ЛН — 3200 К. Если это не соблюдается, то применяются светофильтры (приводные), иначе появятся увеличение контрастности изображения и искажения цвета на темном и светлом в позитиве. Искажения цветопередачи в позитиве также возникают, если с изменением концентрации красителя изменяется форма его спектральной характеристики.

Для правильной цветопередачи необходимо освещать позитив таким же светом, каким освещалась негативная кинопленка при съемке, т. е. с $T_c = 5000 — 6500$ К (ксеноновая лампа) для 35-мм кинолент и с $T_c = 3200$ К (лампа накаливания) для 16-мм кинолент.

Следует отметить, что для колориметрически правильной цветопередачи результирующие характеристики спектральной чувствительности негативной и позитивной кинопленок, взятых вместе, должны быть идеальными характеристиками для основных цветов R, G, B, создаваемых позитивной кинопленкой при освещении от заданного источника света.

5.3. ЯРКОСТЬ И НАСЫЩЕННОСТЬ ЦВЕТОВ В ЦВЕТНОМ КИНОФИЛЬМЕ И ЦВЕТНОМ ТЕЛЕВИДЕНИИ

В § 3.3 было указано, что контрастность цветного изображения на экране цветного кинескопа в слабо освещенном помещении составляет $C_к = 20 \ldots 40$ (оптическая плотность $D_к = 1{,}3 \ldots 1{,}6$), контрастность цветного изображения на позитивной цветной киноленте $C_ф = 270 \ldots 280$, а на экране кинотеатра $C_ф = 70 \ldots 80$ ($D_ф = 1{,}8 \ldots 2$). Контрастность сцен (первичного оригинала), снимаемых на кинопленку, составляет $C_0 \approx 80$. Таким образом, условие (3.46) $C_п = C_0$ в цветном телевидении при передаче изображений цветных кинофильмов не выполняется, что приводит к искажениям цветопереда-

чи по сравнению с изображением на позитивной киноленте (вторичный оригинал) и с первичным оригиналом. Неравенство контрастностей ($C_к \neq C_ф$) сопровождается различием зависимостей насыщенности цвета от его яркости в цветном телевидении и цветном кино (этот вопрос исследовался Брюером, Лэддом и Пинни [227], которые показали, что в цветном телевизионном изображении нет насыщенных цветов с малой яркостью, а в цветном кино нет насыщенных цветов с большой яркостью, диапазон яркостей в цветном телевизионном изображении меньше, чем в цветном кино; насыщенные цвета в цветном телевидении могут быть только с большой яркостью, а в цветном кино — только с малой яркостью).

При воспроизведении изображений с цветной киноленты в цветном телевидении получаемая гамма цветов имеет ограниченную насыщенность, а насыщенные цвета имеют ограниченный диапазон яркостей, особенно для синих и зеленых цветов (для красного и желтого цветов — в меньшей мере). Детали изображения на киноленте с малой яркостью и высокой насыщенностью не воспроизводятся правильно в цветном телевидении.

Для улучшения воспроизведения в цветном телевидении цветных кинофильмов рекомендуется повышать в изображении яркость темных и насыщениость светлых цветов киноленты [47, с. 254 ... 257].

5.4. ЭЛЕКТРОННОЕ МАСКИРОВАНИЕ (ЛОГАРИФМИРУЮЩАЯ ЦВЕТОКОРРЕКЦИЯ)

Для коррекции искажений цветопередачи, вызванных побочным поглощением света слоями кинопленки (рис. 5.9), применяется электронное маскирование. Если преобразователь свет — сигнал является линейным прибором, то при передаче изображения с цветного позитива с яркостью $L_п$ из (5.11) имеем сигнал

$$E = K_1 L_п = K_1 K_п \tau_п = K_2 \tau_п, \tag{5.24}$$

где $\tau_п$ — коэффициент пропускания позитивной киноленты, отсюда

$$\lg E = \lg K_2 + \lg \tau_п. \tag{5.25}$$

Из закона Бугера — Бира (2.332) следует

$$\lg \tau_\lambda = -m_\lambda t C, \tag{5.26}$$

где C — концентрация красителя, г/см^3; m_λ — спектральный показатель поглощения; t — длина пути света в среде, создающей поглощение.

Из (2.335) имеем $D_\lambda = -\lg \tau_\lambda$ и с учетом (5.26) получим

$$D_\lambda = m_\lambda t C. \tag{5.27}$$

Подставив (5.26) в (5.25), имеем

$$\lg E = \lg K_2 - m_\lambda t C = \lg K_2 - D_\lambda.$$

Из табл. 5.3 следует, что на синих участках позитива сигнал E_B в канале B будет создан синей частью спектра источника света, прошедшей через правильные красители $П$ и $Г$ на позитивной киноленте с концентрациями $C_П$ и $C_Г$ и вредный краситель $Ж$ с концентрацией $C'_Ж$, и поэтому оптическая плотность этих участков киноленты будет больше требуемой (правильной) и ее следует уменьшить на значение $C'_Ж$ путем уменьшения суммарной концентрации $C_П + C_Г$ на значение $C'_Ж$. Тогда правильная концентрация, обозначаемая $C_{B0} = C_П + C_Г - C'_Ж$, создаст правильный сигнал E_{B0} в канале B. Преобразуем это выражение

$$\begin{aligned} C_{B0} &= -(C'_Ж - C_П - C_Г + C'_Ж - C'_Ж) = \\ &= -|-C'_Ж + (C'_Ж - C_П) + (C'_Ж - C_Г)| = \\ &= C'_Ж - (C'_Ж - C_П) - (C'_Ж - C_Г). \end{aligned} \tag{5.28}$$

Аналогично, пользуясь в табл. 5.3 для каналов G и R, получим

$$\begin{aligned} C_{G0} &= C_Ж + C_Г - C'_П = C'_П - (C'_П - C_Ж) - (C'_П - C_Г); \\ C_{R0} &= C_П + C_Ж - C'_Г = C'_Г - (C'_Г - C_Ж) - (C'_Г - C_П). \end{aligned} \tag{5.29}$$

Концентрации C_{G0} и C_{R0} создают правильные сигналы E_{G0} и E_{R0} в каналах G и R. Подставив (5.27) в (5.28) и (5.29), получим для оптических плотностей (множители mt войдут в обе части равенств и поэтому сократятся)

$$\begin{aligned} D_{R0} &= D'_Г - (D'_Г - D_Ж) - (D'_Г - D_П); \\ D_{G0} &= D'_П - (D'_П - D_Ж) - (D'_П - D_Г); \\ D_{B0} &= D'_Ж - (D'_Ж - D_П) - (D'_Ж - D_Г). \end{aligned} \tag{5.30}$$

Полагая в (5.27) $\lg K_2 = 0$, получим

$$C = -a \lg E; \ \lg E = -bC; \ D = -\lg E, \tag{5.31}$$

где a и b — постоянные коэффициенты для данного сигнала (для трех сигналов E_R, E_G, E_B эти коэффициенты различны и равны a_R, a_G, a_B; $b_R; b_G, b_B$).

На рис. 5.10 показана схема обработки сигналов при электронном маскировании. Здесь *1* — источник освещения киноленты; *2* — позитивная кинолента; *3* — светоделительная оптика; *4* — три передающие трубки и предварительные видеоусилители (ПВУ); *5* — логарифмирующие усилители; М1 — маскирующая матрица; *6* — потенцирующие усилители; М2 — матрица для коррекции спектральных характеристик камеры; *7* — гамма-корректоры. Матрицы М1 и М2 состоят из трех субматриц. В соответствии с (5.31) на входы каждой субматрицы М1 подаются логарифмы трех сигналов E_R, E_G, E_B (это реальные сигналы, имеющиеся на выходах ПВУ). В каждой субматрице эти лога-

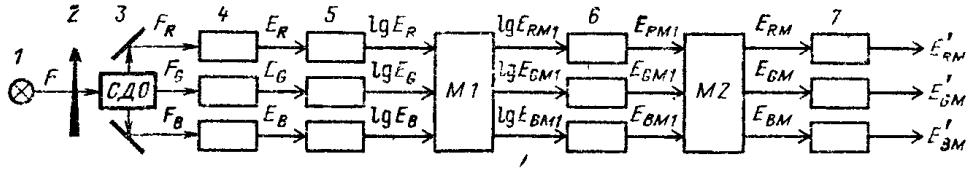


Рис. 5.10. Схема электронного маскирования

рифмы с соответствующими коэффициентами матрицирования складываются, и на выходе субматриц, таким образом, создаются логарифмы реальных сигналов E_{RM1}, E_{GM1}, E_{BM1}, поступающие на потенцирующие усилители, на выходах которых создаются сигналы E_{RM1}, E_{GM1}, E_{BM1}. Эти сигналы поступают на входы матрицы М2, которая вырабатывает сигналы E_{RM}, E_{GM}, E_{BM}, поступающие на гамма-корректоры. С выхода ГК сигналы E'_{RM}, E'_{GM}, E'_{BM} поступают через видеоусилители и тракт передачи и приема на цветной кинескоп. На выходе матрицы М1 логарифмы реальных сигналов:

$$\lg E_{RM1} = a_{11} \lg E_R + a_{12} \lg E_G + a_{13} \lg E_B;$$
$$\lg E_{GM1} = a_{21} \lg E_R + a_{22} \lg E_G + a_{23} \lg E_B;$$
$$\lg E_{BM1} = a_{31} \lg E_R + a_{32} \lg E_G + a_{33} \lg E_B. \qquad (5.32)$$

Для определения коэффициентов матрицирования a_{11}, a_{12}, ... a_{33} в (5.32) необходимо знать правильные сигналы E_{Ro}, E_{Go}, E_{Bo} на входах ГК, необходимые для создания на экране кинескопа набора правильных тест-цветов. Коэффициенты матрицирования матрицы М2 должны быть известны (определяются по методике, изложенной в § 4.3), что позволяет определить правильные сигналы E_{RoM}, E_{GoM}, E_{BoM} на входе М2 и их логарифмы на выходе М1 для каждого тест-цвета. Далее этот набор тест-цветов фотографируется на негативную киноленту, с нее изготавливаются их позитивы на позитивной киноленте и измеряется их спектральное пропускание. Зная спектральную плотность источника света в передающей телевизионной камере, определяют спектральную плотность света, прошедшего в камеру через киноленту и далее, зная спектральные характеристики этой камеры, определяют для каждого тест-цвета реальные сигналы E_R, E_G, E_B на выходе камеры, их логарифмы на входе М1 и логарифмы на выходе М1, т. е. $\lg E_{RM1}$, $\lg E_{GM1}$, $\lg E_{BM1}$, и находят ошибки в сигналах как разности $\lg E_{RoM} - \lg E_{RM1}$; $\lg E_{GoM} - \lg E_{GM1}$; $\lg E_{BoM} - \lg E_{BM1}$ для каждого тест-цвета. Применяя метод наименьших квадратов, минимизируем эти ошибки для набора тест-цветов и находим коэффициенты матрицирования в (5.32) по методике § 4.3.

Можно матрицы М1 и М2 объединить, с тем чтобы матрица М1 выполняла и функции М2.

Основные требования к цветным кинофильмам для цветного телевидения. Для получения высокого качества цветного телевизионно-

го изображения цветных кинофильмов рекомендуется выполнять следующие условия при съемке кинофильмов:

задний план должен иметь небольшую насыщенность цвета, поверхность его должна быть матовой, яркость — средней, что позволяет выделить передний план в изображении;

максимальный коэффициент отражения на белом не должен превышать 60 %, а на черном должен быть не менее 3 %;

неравномерность освещенности сцены должна быть не более 2:1;

цветовая температура источников освещения сцены должна устанавливаться с точностью ± 100 К;

насыщенные цвета должны быть яркими, не должно быть темных цветов, оптическая плотность позитива не должна превышать 2,2; минимальная его оптическая плотность должна быть не менее 0,4 (белое).

5.5. НЕЛИНЕЙНАЯ КОРРЕКЦИЯ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЦВЕТНЫХ КИНОФИЛЬМОВ

Для правильного цветовоспроизведения яркости и цветности первичного оригинала на экране кинескопа при передаче изображений цветных кинофильмов необходимо выполнить условие (3.13), т. е. $L_и = CL_o^Г$ при $Г = 1$. Однако в кинофотопроцессе характеристическая кривая (см. рис. 5.2, *а*) имеет для негативной и позитивной кинопленок S-образную форму, и ее фотографическая широта (т. е. протяженность линейного участка) относительно невелика. Нелинейность этой характеристики приводит к искажениям передачи градаций яркости, насыщенности и цветового тона в изображении на экране цветного кинескопа. Для снижения этих искажений следует вводить в видеотракт корректор нелинейности результирующей характеристической кривой (негатив плюс позитив). Амплитудная характеристика такого корректора должна быть обратной этой характеристической кривой. Три таких корректора включаются между матрицей М1 и логарифмирующими усилителями (см. рис. 5.10), и на их входы подаются сигналы вида $\lg E_R$, $\lg E_G$, $\lg E_B$. Такие же сигналы с выходов этих корректоров подаются на входы матрицы М1.

5.6. ПОЛУЧЕНИЕ ПОЗИТИВНОГО ЦВЕТНОГО ТЕЛЕВИЗИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ С ЦВЕТНОЙ НЕГАТИВНОЙ КИНОЛЕНТЫ

Использование негатива кинофильма для телевизионной передачи позволяет уменьшить искажения цветопередачи, вносимые кинофотопроцессом, сократить время обработки киноленты и снизить затраты (в том числе на изготовление позитива). Правильную (позитивную) яркость в изображении на экране кинескопа в этом случае получают с помощью отрицательного гамма-корректора, у которого $\gamma_{гк} < 0$, а позитив по цветности на экране кинескопа получают с по-

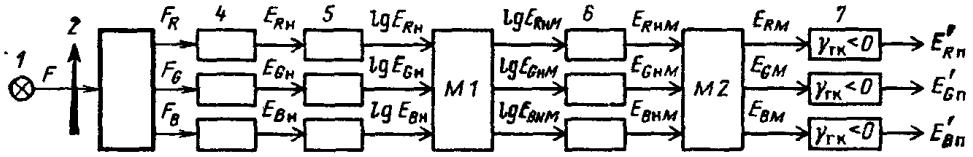


Рис. 5.11. Схема обработки видеосигнала для получения цветного позитива из цветного негатива

мощью матрицы. Полная схема обработки видеосигналов для получения позитива показана на рис. 5.11. Здесь *1* — источник освещения киноленты; *2* — негативная цветная кинолента; *3* — светоделительная оптика; *4* — передающие трубки и предварительные видеоусилители; *5* — логарифмирующие усилители; М1 — маскирующая матрица; *6* — потенцирующие усилители; М2 — матрица для получения позитива по цветности и коррекции спектральных характеристик передающей камеры; *7* — отрицательные гамма-корректоры ($\gamma_{гк} < 0$). Сигналы $E_{Rн}$, $E_{Gн}$, $E_{Bн}$ соответствуют цветам негатива; сигналы $E'_{Rп}$, $E'_{Gп}$, $E'_{Bп}$ создают на экране кинескопа цветное позитивное изображение.

На рис. 5.12 показано распределение с помощью СДО цветоделенных световых потоков, падающих на светочувствительные слои передающих трубок от различных цветов на негативе (в соответствии с рис.5.7). Здесь *1* — первичный оригинал с указанными цветами, *2* — негатив *3* — СДО, *4* — ПТ. Поток F_R создается цветами Ж, К, П негатива, поток F_G — цветами Ж, G, Г, поток F_B — цветами П, В, Г. На входе кинескопа должны быть сигналы E''_{R0}, E''_{G0}, E''_{B0}. Для получения позитивного изображения первичного оригинала, по ним определяем правильные сигналы E_{RM0}, E_{GM0}, E_{BM0} на входе отрицательного ГК. Измеряем $\tau_{\lambda н}$ негатива на этих цветах и спектральную характеристику $P_{\lambda н}$ освещающего его света и находим P_λ света, поступающего от негатива в камеру. По ее спектральным характеристикам находим реальные сигналы $E_{Rн}$, $E_{Gн}$, $E_{Bн}$ на выходе камеры, их логарифмы подаем на М1. На входе М2 получаем сигналы $E_{RнM}$, $E_{GнM}$, $E_{BнM}$ (в них скорректированы побочные поглощения). Зная E_{RM0}, E_{GM0}, E_{BM0}, находим коэффициенты матрицирования М2 (см. § 4.3). С выхода ГК сигналы позитивного изображения подадим на кинескоп. Матрицы М1 и М2 можно объединить.

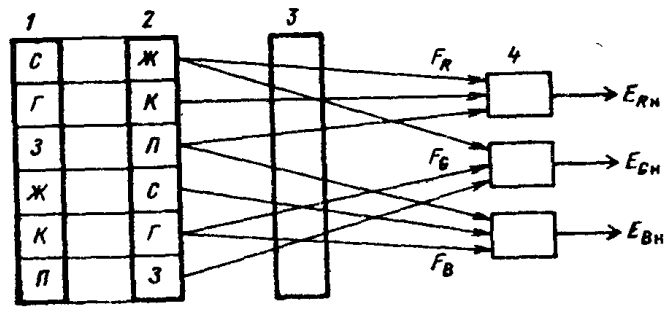


Рис. 5.12. Распределение световых потоков, падающих на передающие трубки

ПЕРЕХОД ИЗ СТАНДАРТНОЙ СИСТЕМЫ XYZ МКО — 1931 г. В СИСТЕМУ $R_{\text{п}}G_{\text{п}}B_{\text{п}}$ ОСНОВНЫХ ЦВЕТОВ ПРИЕМНИКА NTSC

В литературе по теории цветного телевидении широко используются результаты такого перехода. Приведем эти результаты и методику их получения. Для перехода из системы XYZ МКО-1931 г. в систему $R_{\text{п}}G_{\text{п}}B_{\text{п}}$ используем формулы, приведенные в гл.2. Чтобы не нарушать порядка расчета, изложенного в § 2.8, единичные количества цвета в «старой» системе XYZ обозначим круглыми скобками $(R_{\text{п}})$, $(G_{\text{п}})$, $(B_{\text{п}})$, (X), (Y), (Z), $(Ц)$; единичные количества цвета в новой системе (основных цветов приемника) будем обозначать квадратными скобками $[R_{\text{п}}]$, $[G_{\text{п}}]$, $[B_{\text{п}}]$, $[X]$, $[Y]$, $[Z]$, $[Ц]$. В соответствии со сказанным при использовании формул гл. 2 заменим R, G, B на X, Y, Z, а X, Y, Z — на $R_{\text{п}}$, $G_{\text{п}}$, $B_{\text{п}}$, r, g, b — на x, y, z, x, y, z — на $r_{\text{п}}$, $g_{\text{п}}$, $b_{\text{п}}$.

Для единичных количеств основных цветов $R_{\text{п}}G_{\text{п}}B_{\text{п}}$ в системе XYZ можно написать единичные уравнения, аналогичные (2.124):

$$(R_{\text{п}}) = x_R(X) + y_R(Y) + z_R(Z); \quad (G_{\text{п}}) = x_G(X) + y_G(Y) + z_G(Z);$$
$$(B_{\text{п}}) = x_B(X) + y_B(Y) + z_B(Z), \qquad (\text{П}.1)$$

где индексы R, G, B при x, y, z означают $R_{\text{п}}$, $G_{\text{п}}$, $B_{\text{п}}$ соответственно. Здесь x, y, z с индексами R, G, B являются координатами цветности цветов $R_{\text{п}}$, $G_{\text{п}}$, $B_{\text{п}}$ в системе XYZ МКО—1931 г., так что $x_R + y_R + z_R = 1$; $x_G + y_G + z_G = 1$; $x_B + y_B + z_B = 1$.

Определение матриц. По аналогии с (2.124) и (2.98) запишем (П.1) в матричной форме

$$((R_{\text{п}}), (G_{\text{п}}), (B_{\text{п}})) = \widetilde{\mathbf{F}}((X), (Y), (Z)). \qquad (\text{П}.2)$$

Для треугольника NTSC из табл. 3.4 имеем

$$\widetilde{\mathbf{F}} = \begin{pmatrix} x_R & y_R & z_R \\ x_G & y_G & z_G \\ x_B & y_B & z_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0{,}67 & 0{,}33 & 0 \\ 0{,}21 & 0{,}71 & 0{,}08 \\ 0{,}14 & 0{,}08 & 0{,}78 \end{pmatrix}. \qquad (\text{П}.3)$$

Для нахождения обратной матрицы $\widetilde{\mathbf{F}}^{-1}$ воспользуемся (2.69), (2.73), (2.74):

$$r'_{\text{п}(X)} = D^{-1}(y_G z_B - y_B z_G) = 1{,}73009; \; g'_{\text{п}(X)} = D^{-1}(-y_R z_B + y_B z_R) = -0{,}81353;$$
$$b'_{\text{п}(X)} = D^{-1}(y_R z_G - y_G z_R) = 0{,}08344;$$
$$r'_{\text{п}(Y)} = D^{-1}(-x_G z_B + x_B z_G) = -0{,}48230;$$
$$g'_{\text{п}(Y)} = D^{-1}(x_R z_B - x_B z_R) = 1{,}65171;$$
$$b'_{\text{п}(Y)} = D^{-1}(-x_R z_G + x_G z_R) = -0{,}16940;$$
$$r'_{\text{п}(Z)} = D^{-1}(x_G y_B - x_B y_G) = -0{,}26106;$$
$$g'_{\text{п}(Z)} = D^{-1}(-x_R y_B + x_B y_R) = -0{,}02339;$$
$$b'_{\text{п}(Z)} = D^{-1}(x_R y_G - x_G y_R) = 1{,}28445. \qquad (\text{П}.4)$$

$$D = x_R y_G z_B + y_R z_G x_B + z_R x_G y_B - x_R z_G y_B - y_R x_G z_B - z_R y_G x_B = 0{,}31640. \qquad (\text{П}.5)$$

Из (2.127) получаем

$$\widetilde{\mathbf{F}}^{-1}=\begin{pmatrix} r'_{\text{п}(X)} & g'_{\text{п}(X)} & b'_{\text{п}(X)} \\ r'_{\text{п}(Y)} & g'_{\text{п}(Y)} & b'_{\text{п}(Y)} \\ r'_{\text{п}(Z)} & g'_{\text{п}(Z)} & b'_{\text{п}(Z)} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 1,73009 & -0,81353 & 0,08344 \\ -0,48230 & 1,65171 & -0,16940 \\ -0,26106 & -0,02339 & 1,28445 \end{pmatrix}. \qquad (\text{П}.6)$$

В соответствии с (2.127) имеем

$$((X),\ (Y),\ (Z))=\widetilde{\mathbf{F}}^{-1}((R_{\text{п}}),\ (G_{\text{п}}),\ (B_{\text{п}})). \qquad (\text{П}.7)$$

Для (П2.6) справедливо

$$r'_{\text{п}(X)}+g'_{\text{п}(X)}+b'_{\text{п}(X)}=1;\ r'_{\text{п}(Y)}+g'_{\text{п}(Y)}+b'_{\text{п}(Y)}=1;$$
$$r'_{\text{п}(Z)}+g'_{\text{п}(Z)}+b'_{\text{п}(Z)}=1. \qquad (\text{П}.8)$$

По аизлогии с (2.130) и (2.131) напишем

$$Ц=X(X)+Y(Y)+Z(Z)=R_{\text{п}}(R_{\text{п}})+G_{\text{п}}(G_{\text{п}})+B_{\text{п}}(B_{\text{п}}), \qquad (\text{П}.9)$$
$$R_{\text{п}}=X_R(X)+Y_R(Y)+Z_R(Z);\quad G_{\text{п}}=X_G(X)+Y_G(Y)+Z_G(Z);$$
$$B_{\text{п}}=X_B(X)+Y_B(Y)+Z_B(Z). \qquad (\text{П}.10)$$

Отсюда модули основных цветов приемника в системе XYZ, взятых в этой системе в количествах $R_{\text{п}}$, $G_{\text{п}}$, $B_{\text{п}}$, для создании цвета их смеси $Ц$:

$$m_R=X_R+Y_R+Z_R;\ m_G=X_G+Y_G+Z_G;\ m_B=X_B+Y_B+Z_B. \qquad (\text{П}.11)$$

По аналогии с (2.134) напишем

$$(m_R,\ m_G,\ m_B)=\widetilde{\mathbf{F}}_{\text{c}}^{-1}(X,\ Y,\ Z). \qquad (\text{П}.12)$$

Из (П2. 9) следует

$$m_R+m_G+m_B=X+Y+Z. \qquad (\text{П}.13)$$

Меняя в матрице $\widetilde{\mathbf{F}}^{-1}$ из (П.6) местами строки и столбцы, получим

$$\widetilde{\mathbf{F}}_{\text{c}}^{-1}\begin{pmatrix} 1,73009 & -0,48230 & -0,26106 \\ -0,81353 & 1,65171 & -0,02339 \\ 0,08344 & -0,16940 & 1,28445 \end{pmatrix}. \qquad (\text{П}.14)$$

Рассмотрим общий случай, когда равностимульные цвета в обеих системах $R_{\text{п}}G_{\text{п}}B_{\text{п}}$ и XYZ не одинаковы. В качестве эталонного цвета, равностимульного в системе $R_{\text{п}}G_{\text{п}}B_{\text{п}}$, возьмем стандартный белый цвет C, который в системе XYZ не является равностимульным (в системе XYZ равностимульным цветом является равноэнергетический белый цвет E). Для белого цвета C имеем из табл. 2.10

$$x_{\text{э}}\ \ 0.31006;\ y_{\text{э}}=0,31616;\ z_{\text{э}}=0,37378. \qquad (\text{П}.15)$$

В системе $R_{\text{п}}G_{\text{п}}B_{\text{п}}$ для треугольника основных цветов NTSC равностимульным цветом являетси белый цвет C, для которого

$$r_{\text{п.э}}=g_{\text{п.э}}=b_{\text{п.э}}=1/3=0,33333, \qquad (\text{П}.16)$$
$$(C)=x_{\text{э}}(X)+y_{\text{э}}(Y)+z_{\text{э}}(Z)=0,31006(X)+0,31616(Y)+0,37378(Z). \qquad (\text{П}.17)$$
$$[C]=r_{\text{п.э}}[R_{\text{п}}]+g_{\text{п.э}}[G_{\text{п}}]+b_{\text{п.э}}[B_{\text{п}}]=(1/3)[R_{\text{п}}]+$$
$$+(1/3)[G_{\text{п}}]+(1/3)[B_{\text{п}}]. \qquad (\text{П}.18)$$

Из (2.140) имеем

$$\delta_1 = x_э r'_{п(X)} + y_э r'_{п(Y)} + z_э r'_{п(Z)} = 0,28637;\ \ \delta_2 = x_э g'_{п(X)} + y_э g'_{п(Y)} + z_э g'_{п(Z)} = 0,26122;\ \ \delta_3 = x_э b'_{п(X)} + y_э b'_{п(Y)} + z_э b'_{п(Z)} = 0,45242, \qquad (П.19)$$

где $\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 1$. Полагаем, как в (2.137),

$$(C) = [C], \qquad (П.20)$$

т. е. иркости $L_{(C)}$ и $L_{[C]}$ количеств (C) и $[C]$ одинаковы. Используя (П.19), получим аналогичио (2.138)

$$(C) = \delta_1 (R_п) + \delta_2 (G_п) + \delta_3 (B_п) = 0,28637\,(R_п) + 0,26122\,(G_п) + 0,45242\,(B_п). \qquad (П.21)$$

Аналогичио (2.144) получим модули количеств цветов $(R_п)$, $(G_ц)$, $(B_п)$ в системе $R_п G_п B_п$:

$$m_{(R)} = r_{п.э}/\delta_1 = 1,16400;\ \ m_{(G)} = g_{п.э}/\delta_1 = 1,27607;$$
$$m_{(B)} = b_{п.э}/\delta_3 = 0,73679. \qquad (П.22)$$

По аналогии с (2.145) из (2.99) имеем матрицу:

$$\widetilde{G} = \begin{pmatrix} m_{(R)} & 0 & 0 \\ 0 & m_{(G)} & 0 \\ 0 & 0 & m_{(B)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,16400 & 0 & 0 \\ 0 & 1,27607 & 0 \\ 0 & 0 & 0,73679 \end{pmatrix}. \qquad (П.23)$$

По аналогии с (2.99) напишем

$$((R_п), (G_п), (B_п)) = \widetilde{G}\,([R_п], [G_ц], [B_п]). \qquad (П.24)$$

По аналогии с (2.149) обратная матрица

$$\widetilde{G}^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{m_{(R)}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_{(G)}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_{(B)}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,85911 & 0 & 0 \\ 0 & 0,78366 & 0 \\ 0 & 0 & 1,35725 \end{pmatrix}. \qquad (П.25)$$

Из (2.99) и (П.23) следует

$$(R_п) = 1,16400\,[R_п];\ (G_п) = 1,27607\,[G_п];\ (B_п) = 0,73679\,[B_п], \qquad (П.26)$$
$$[R_п] = 0,85911\,(R_п);\ [G_п] = 0,78366\,(G_п);\ [B_п] = 1,35724\,(B_п). \qquad (П.27)$$

По аналогии с (2.153) имеем

$$R_{п(X)} = r'_{п(X)}\, m_{(R)};\ \ G_{п(X)} = g'_{п(X)}\, m_{(G)};\ \ B_{п(X)} = b'_{п(X)}\, m_{(B)};$$
$$R_{п(Y)} = r'_{п(Y)}\, m_{(R)};\ \ G_{п(Y)} = g'_{п(Y)}\, m_{(G)};\ \ B_{п(Y)} = b'_{п(Y)}\, m_{(B)};$$
$$R_{п(Z)} = r'_{п(Z)}\, m_{(R)};\ \ G_{п(Z)} = g'_{п(Z)}\, m_{(G)};\ \ B_{п(Z)} = b'_{п(Z)}\, m_{(B)}. \qquad (П.28)$$

Отсюда, используя (П.6) и (П.22), получаем

$$R_{п(X)} = 2,01383;\ \ G_{п(X)} = -1,03812;\ \ B_{п(X)} = 0,06148;$$

$$R_{\text{п}(Y)} = -0{,}5614; \quad G_{\text{п}(Y)} = 2{,}1077; \quad B_{\text{п}(Y)} = -0{,}12481;$$
$$R_{\text{п}(Z)} = -0{,}30387; \quad G_{\text{п}(Z)} = -0{,}02985; \quad B_{\text{п}(Z)} = 0{,}94636. \qquad (\text{П}.29)$$

По аналогии с (2.151), используя (П.6) и (П.22), имеем

$$m(X) = R_{\text{п}(X)} + G_{\text{п}(X)} + B_{\text{п}(X)} = 1{,}03719;$$
$$m(Y) = R_{\text{п}(Y)} + G_{\text{п}(Y)} + B_{\text{п}(Y)} = 1{,}42149;$$
$$m(Z) = R_{\text{п}(Z)} + G_{\text{п}(Z)} + B_{\text{п}(Z)} = 0{,}61264. \qquad (\text{П}.30)$$

По аналогии с (2.149), используя (П.29), имеем

$$\widetilde{\mathbf{L}} = \begin{pmatrix} m_{(X)} & 0 & 0 \\ 0 & m_{(Y)} & 0 \\ 0 & 0 & m_{(Z)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1{,}03718 & 0 & 0 \\ 0 & 1{,}42149 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}61264 \end{pmatrix}; \qquad (\text{П}.31)$$

$$\widetilde{\mathbf{L}}^{-1} = \begin{pmatrix} \dfrac{1}{m_{(X)}} & 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{m_{(Y)}} & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{1}{m_{(Z)}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0{,}96415 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}70349 & 0 \\ 0 & 0 & 1{,}63227 \end{pmatrix}. \qquad (\text{П}.32)$$

здесь по аналогии с (2.100) имеем

$$((X), (Y), (Z))_{\text{п}} = \widetilde{\mathbf{L}}([X], [Y], [Z]). \qquad (\text{П}.33)$$

Из (2.100) и (П.31) следует

$$(X) = 1{,}03718\,[X]; \quad (Y) = 1{,}42149\,[Y]; \quad (Z) = 0{,}61264\,[Z]. \qquad (\text{П}.34)$$

Из (П.34) следует

$$[X] = 0{,}96415\,(X); \quad [Y] = 0{,}70349\,(Y); \quad [Z] = 1{,}63227\,(Z). \qquad (\text{П}.35)$$

Подставив (П2.31) в (2.154), из (2.101) имеем матрицу

$$\widetilde{\mathbf{M}} = \begin{pmatrix} R_{\text{п}(X)} & G_{\text{п}(X)} & B_{\text{п}(X)} \\ R_{\text{п}(Y)} & G_{\text{п}(Y)} & B_{\text{п}(Y)} \\ R_{\text{п}(Z)} & G_{\text{п}(Z)} & B_{\text{п}(Z)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2{,}01383 & -1{,}03812 & 0{,}06148 \\ -0{,}56140 & 2{,}10770 & -0{,}12481 \\ -0{,}30387 & -0{,}02985 & 0{,}94636 \end{pmatrix}. \qquad (\text{П}.36)$$

По аналогии с (2.101) имеем

$$((X), (Y), (Z))_{\text{п}} = \widetilde{\mathbf{M}}([R_{\text{п}}], [G_{\text{п}}], [B_{\text{п}}]). \qquad (\text{П}.37)$$

Используя (2.69), (2.73) ... (2.75) и (П.36), найдем обратную матрицу $\widetilde{\mathbf{M}}^{-1}$:

$$D = R_{\text{п}(X)} G_{\text{п}(Y)} B_{\text{п}(Z)} + R_{\text{п}(Y)} G_{\text{п}(Z)} B_{\text{п}(X)} + R_{\text{п}(Z)} G_{\text{п}(X)} B_{\text{п}(Y)} -$$
$$- R_{\text{п}(X)} G_{\text{п}(Z)} B_{\text{п}(Y)} - R_{\text{п}(Y)} G_{\text{п}(X)} B_{\text{п}(Z)} - R_{\text{п}(Z)} G_{\text{п}(Y)} B_{\text{п}(X)} = 3{,}45861. \qquad (\text{П}.38)$$

$$k'_1 = R'_{\text{п}(X)} = (G_{\text{п}(Y)}\, B_{\text{п}(Z)} - G_{\text{п}(Z)}\, B_{\text{п}(Y)})/D = 0{,}57560;$$
$$k'_2 = G'_{\text{п}(X)} = (G_{\text{п}(Z)}\, B_{\text{п}(X)} - G_{\text{п}(X)}\, B_{\text{п}(Z)})/D = 0{,}28350;$$
$$k'_3 = B'_{\text{п}(X)} = (G_{\text{п}(X)}\, B_{\text{п}(Y)} - G_{\text{п}(Y)}\, B_{\text{п}(X)})/D = 0{,}00000;$$
$$k'_4 = R'_{\text{п}(Y)} = (R_{\text{п}(Z)}\, B_{\text{п}(Y)} - R_{\text{п}(Y)}\, B_{\text{п}(Z)})/D = 0{,}16457;$$
$$k'_5 = G'_{\text{п}(Y)} = (R_{\text{п}(X)}\, B_{\text{п}(Z)} - R_{\text{п}(Z)}\, B_{\text{п}(X)})/D = 0{,}55639;$$
$$k'_6 = B'_{\text{п}(Y)} = (R_{\text{п}(Y)}\, B_{\text{п}(X)} - R_{\text{п}(X)}\, B_{\text{п}(Y)})/D = 0{,}06269;$$
$$k'_7 = R'_{\text{п}(Z)} = (R_{\text{п}(Y)}\, G_{\text{п}(Z)} - R_{\text{п}(Z)}\, G_{\text{п}(Y)})/D = 0{,}19001;$$
$$k'_8 = G'_{\text{п}(Z)} = (R_{\text{п}(Z)}\, G_{\text{п}(X)} - R_{\text{п}(X)}\, G_{\text{п}(Z)})/D = 0{,}10858;$$
$$k'_9 = B'_{\text{п}(Z)} = (R_{\text{п}(X)}\, G_{\text{п}(Y)} - R_{\text{п}(Y)}\, G_{\text{п}(X)})/D = 1{,}05865. \qquad (\text{П}.39)$$

$$\widetilde{\mathbf{M}}^{-1} = \begin{pmatrix} R'_{\text{п}(X)} & G'_{\text{п}(X)} & B'_{\text{п}(X)} \\ R'_{\text{п}(Y)} & G'_{\text{п}(Y)} & B'_{\text{п}(Y)} \\ R'_{\text{п}(Z)} & G'_{\text{п}(Z)} & B'_{\text{п}(Z)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0{,}57560 & 0{,}2835 & 0{,}00000 \\ 0{,}16457 & 0{,}55639 & 0{,}06269 \\ 0{,}19001 & 0{,}10858 & 1{,}05865 \end{pmatrix}. \qquad (\text{П}.40)$$

Транспонированные матрицы $\widetilde{\mathbf{M}}_c$ и $\widetilde{\mathbf{M}}_c^{-1}$ равны из (П.36):

$$\widetilde{\mathbf{M}}_c = \begin{pmatrix} R_{\text{п}(X)} & R_{\text{п}(Y)} & R_{\text{п}(Z)} \\ G_{\text{п}(X)} & G_{\text{п}(Y)} & G_{\text{п}(Z)} \\ B_{\text{п}(X)} & B_{\text{п}(Y)} & B_{\text{п}(Z)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2{,}01383 & -0{,}56140 & -0{,}30387 \\ -1{,}03812 & 2{,}10770 & -0{,}02985 \\ 0{,}06148 & -0{,}12481 & 0{,}94636 \end{pmatrix}; \qquad (\text{П}.41)$$

$$\widetilde{\mathbf{M}}_c^{-1} = (\widetilde{\mathbf{M}}^{-1})_c = \begin{pmatrix} R'_{\text{п}(X)} & R'_{\text{п}(Y)} & R'_{\text{п}(Z)} \\ G'_{\text{п}(X)} & G'_{\text{п}(Y)} & G'_{\text{п}(Z)} \\ B'_{\text{п}(X)} & B'_{\text{п}(Y)} & B'_{\text{п}(Z)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0{,}5756 & 0{,}16457 & 0{,}19001 \\ 0{,}2835 & 0{,}55639 & 0{,}10858 \\ 0{,}0000 & 0{,}06269 & 1{,}05865 \end{pmatrix}. \qquad (\text{П}.42)$$

Напомним смысл матриц $\widetilde{\mathbf{M}}_c$ и $\widetilde{\mathbf{M}}_c^{-1}$ из (2.161)

$$(R_{\text{п}},\ G_{\text{п}},\ B_{\text{п}}) = \widetilde{\mathbf{M}}_c\,(X, Y, Z),\ (X, Y, Z) = \widetilde{\mathbf{M}}_c^{-1}\,(R_{\text{п}},\ G_{\text{п}},\ B_{\text{п}}). \qquad (\text{П}.43)$$

Учитывая (П.43), получаем для средней строки (П.42)

$$Y = 0{,}28350R_{\text{п}} + 0{,}55639G_{\text{п}} + 0{,}10858B_{\text{п}}. \qquad (\text{П}.44)$$

На основании (2.187) имеем

$$A' = 0{,}28350 + 0{,}55639 + 0{,}10858 = 0{,}94847 \qquad (\text{П}.45)$$

при $R_{\text{п}} = G_{\text{п}} = B_{\text{п}} = 1$. Чтобы иметь $Y = 1$ при $R_{\text{п}} = G_{\text{п}} = B_{\text{п}} = 1$, необходимо по аналогии с (2.188) разделить коэффициенты при $R_{\text{п}}$, $G_{\text{п}}$, $B_{\text{п}}$ в (П.44) на их сумму, т. е. на величину A'. Сделаем это деление для всех строк матрицы $\widetilde{\mathbf{M}}_c^{-1}$ из (П.42), т. е. все элементы этой матрицы разделим на $A' = 0{,}94847$. В результате вместо матрицы $\widetilde{\mathbf{M}}_c^{-1}$ получим по аналогии с (2.189) матрицу

$$\widetilde{\mathbf{A}}_0^{-1} = \frac{1}{A'}\,\widetilde{\mathbf{M}}_c^{-1} = \begin{pmatrix} R'_{\text{п}(X)}/A' & R'_{\text{п}(Y)}/A' & R'_{\text{п}(Z)}/A' \\ G'_{\text{п}(X)}/A' & G'_{\text{п}(Y)}/A' & G'_{\text{п}(Z)}/A' \\ B'_{\text{п}(X)}/A' & B'_{\text{п}(Y)}/A' & B'_{\text{п}(Z)}/A' \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 0{,}60687 & 0{,}17351 & 0{,}20033 \\ 0{,}29890 & 0{,}58662 & 0{,}11448 \\ 0{,}00000 & 0{,}06609 & 1{,}11616 \end{pmatrix}. \qquad (\text{П}.46)$$

С помощью (П.45) и (П.41) из (2.190) получим матрицу, обратную $\widetilde{\mathbf{A}}_0^{-1}$:

$$\widetilde{\mathbf{A}}_0 = A' \widetilde{\mathbf{M}}_0 - \begin{pmatrix} 1{,}91007 & -0{,}53247 & -0{,}28822 \\ -0{,}98464 & 1{,}99911 & -0{,}02831 \\ 0{,}05831 & -0{,}11838 & 0{,}89761 \end{pmatrix}. \qquad (\text{П}.47)$$

Вместо (П.43) напишем по аналогии с (2.191) и (2.192):

$$(R_\text{П}, G_\text{П}, B_\text{П}) = \widetilde{\mathbf{A}}_0 (X, Y, Z), \quad (X, Y, Z) = \widetilde{\mathbf{A}}_0^{-1} (R_\text{П}, G_\text{П}, B_\text{П}). \qquad (\text{П}.48)$$

Подставив сюда матрицы (П.47) и (П.46), получим координаты цвета $Ц$:

$$\begin{aligned} R_\text{П} &= 1{,}91007X - 0{,}53247Y - 0{,}28822Z; \\ G_\text{П} &= -0{,}98464X + 1{,}99911Y - 0{,}02831Z; \\ B_\text{П} &= 0{,}05831X - 0{,}11838Y + 0{,}89761Z; \end{aligned} \qquad (\text{П}.49)$$

$$\begin{aligned} X &= 0{,}60687R_\text{П} + 0{,}17351G_\text{П} + 0{,}20033B_\text{П}; \\ Y &= 0{,}29890R_\text{П} + 0{,}58662G_\text{П} + 0{,}11448B_\text{П}; \\ Z &= 0{,}00000R_\text{П} + 0{,}06609G_\text{П} + 1{,}11616B_\text{П}. \end{aligned} \qquad (\text{П}.50)$$

Формулы (П.49) и (П.50) дают связь между координатами цвета $Ц$ в системах $R_\text{П}G_\text{П}B_\text{П}$ и XYZ при основных цветах приемника NTSC и белом C в качестве $Ц_\text{р}$, на котором $Y = 1$. Обратим внимание на среднюю строку (П.50) — здесь Y по определению представляет всю яркость цвета $Ц$, и эта яркость складывается из 0,299 $R_\text{П}$, 0,587 $G_\text{П}$ и 0,114 $B_\text{П}$, где $R_\text{П}$, $G_\text{П}$, $B_\text{П}$ — количества основных цветов приемника в системе $R_\text{П}\,G_\text{П}B_\text{П}$. Пусть для равностимульного цвета $R_\text{П} = G_\text{П} = B_\text{П} = 1$. Тогда из (П.50) получим $X = 0{,}98071$; $Y = 1$; $Z = 1{,}18225$ и $X + Y + Z = 3{,}16296$. Модуль этого цвета $m_\text{э} = X + Y + Z = 3{,}16296$, и отсюда находим координаты цветности равностимульного цвета (белое C в нашем случае): $x = X/m_\text{э} = 0{,}31006$; $y = Y/m_\text{э} = 0{,}31616$; $z = Z/m_\text{э} = 0{,}37378$, что правильно.

Матрицу $\widetilde{\mathbf{M}}_C^{-1}$ можно было также найти по формулам, аналогичным (2.166)—(2.168), используя (П.4):

$$\begin{aligned} &a = g'_{\text{п}(Y)}\, b'_{\text{п}(Z)} - g'_{\text{п}(Z)} b'_{\text{п}(Y)} = 2{,}11758; \; b = -r'_{\text{п}(Y)} b'_{\text{п}(Z)} + r'_{\text{п}(Z)}\, b'_{\text{п}(Y)} = 0{,}66371; \\ &c = r'_{\text{п}(Y)}\, g'_{\text{п}(Z)} - r'_{\text{п}(Z)}\, g'_{\text{п}(Y)} = 0{,}44248; \\ &d = -g'_{\text{п}(X)}\, b'_{\text{п}(Z)} + g'_{\text{п}(Z)}\, b'_{\text{п}(X)} = 1{,}04299; \\ &e = r'_{\text{п}(X)}\, b'_{\text{п}(Z)} - r'_{\text{п}(Z)}\, b'_{\text{п}(X)} = 2{,}24400; \; f = -r'_{\text{п}(X)}\, g'_{\text{п}(Z)} + r'_{\text{п}(Z)}\, g'_{\text{п}(X)} = 0{,}25285; \\ &g = g'_{\text{п}(X)}\, b'_{\text{п}(Y)} - g'_{\text{п}(Y)}\, b'_{\text{п}(X)} = -0{,}00001; \\ &h = -r'_{\text{п}(X)}\, b'_{\text{п}(Y)} + r'_{\text{п}(Y)}\, b'_{\text{п}(X)} = 0{,}25283; \\ &i = r'_{\text{п}(X)}\, g'_{\text{п}(Y)} - r'_{\text{п}(Y)}\, g'_{\text{п}(X)} = 2{,}46524; \end{aligned} \qquad (\text{П}.51)$$

$$\begin{aligned} D' = {} & r'_{\text{п}(X)}\, g'_{\text{п}(Y)}\, b'_{\text{п}(Z)} + r'_{\text{п}(Y)}\, g'_{\text{п}(Z)}\, b'_{\text{п}(X)} + r'_{\text{п}(Z)}\, g'_{\text{п}(X)}\, b'_{\text{п}(Y)} - \\ & - r'_{\text{п}(X)}\, g'_{\text{п}(Z)}\, b'_{\text{п}(Y)} - r'_{\text{п}(Y)}\, g'_{\text{п}(X)}\, b'_{\text{п}(Z)} - r'_{\text{п}(Z)}\, g'_{\text{п}(Y)}\, b'_{\text{п}(X)} = 3{,}16057. \end{aligned} \qquad (\text{П}.52)$$

Аналогично (2.167) можно написать:

$$R'_{\text{п}\,(X)}=a/(D'm_{(R)});\ R'_{\text{п}\,(Y)}=b/(D'm_{(G)});\ R'_{\text{п}\,(Z)}=c/(D'm_{(B)});$$
$$G'_{\text{п}\,(X)}=d/(D'm_{(R)});\ G'_{\text{п}\,(Y)}=e/(D'm_{(G)});\ G'_{\text{п}\,(Z)}=f/(D'm_{(B)});$$
$$B'_{\text{п}\,(X)}=g/(D'm_{(R)});\ B'_{\text{п}\,(Y)}=h/(D'm_{(G)});\ B'_{\text{п}\,(Z)}=i/(D'm_{(B)}). \qquad (\text{П}.53)$$

Подставив сюда (П.51), (П.52), получим такие же значения элементов матрицы $\widetilde{\mathbf{M}}_c^{-1}$, как в (П.42). По аналогии с (2.102) имеем

$$((R_{\text{п}})),\ (G_{\text{п}}),\ (B_{\text{п}}))=\widetilde{S}([X],\ [Y],\ [Z]). \qquad (\text{П}.54)$$

Используя (2.109) и (2.66), получим из (П.54) матрицу

$$\widetilde{\mathbf{S}}=\widetilde{\mathbf{F}}\,\widetilde{\mathbf{L}}=\begin{pmatrix}0{,}69491 & 0{,}46909 & 0{,}00000\\ 0{,}21781 & 1{,}00926 & 0{,}04901\\ 0{,}14521 & 0{,}11372 & 0{,}47786\end{pmatrix}, \qquad (\text{П}.55)$$

$$\widetilde{\mathbf{S}}^{-1}=\begin{pmatrix}1{,}66807 & -0{,}78436 & 0{,}08045\\ -0{,}33929 & 1{,}16196 & -0{,}11918\\ 0{,}42612 & -0{,}03818 & 2{,}09657\end{pmatrix}. \qquad (\text{П}.56)$$

По аналогии с (2.155) найдем, используя (П.29) и (П.30):

$$r_{\text{п}X}=R_{\text{п}\,(X)}/m_{(X)}=1{,}94163;\ g_{\text{п}X}=G_{\text{п}\,(X)}/m_{(X)}=1{,}00090;$$
$$b_{\text{п}X}=B_{\text{п}\,(X)}/m_{(X)}=0{,}05927;$$
$$r_{\text{п}Y}=R_{\text{п}\,(Y)}/m_{(Y)}=-0{,}39494;\ g_{\text{п}Y}=G_{\text{п}\,(Y)}/m_{(Y)}=1{,}48274;$$
$$b_{\text{п}Y}=B_{\text{п}\,(Y)}/m_{(Y)}=-0{,}08780;$$
$$r_{\text{п}Z}=R_{\text{п}\,(Z)}/m_{(Z)}=0{,}49600;\ g_{\text{п}Z}=G_{\text{п}\,(Z)}/m_{(Z)}=-0{,}04872;$$
$$b_{\text{п}Z}=B_{\text{п}\,(Z)}/m_{(Z)}=1{,}54472. \qquad (\text{П}.57)$$

По аналогии с (2.103) найдем матрицу $\widetilde{\mathbf{R}}$:

$$([X],\ [Y],\ [Z])=\widetilde{\mathbf{R}}\,[(R_{\text{п}}],\ [G_{\text{п}}],\ [B_{\text{п}}]). \qquad (\text{П}.58)$$

Подставив (П.57) в (2.155), имеем

$$\widetilde{\mathbf{R}}=\begin{pmatrix}r_{\text{п}X} & g_{\text{п}X} & b_{\text{п}X}\\ r_{\text{п}Y} & g_{\text{п}Y} & b_{\text{п}Y}\\ r_{\text{п}Z} & g_{\text{п}Z} & b_{\text{п}Z}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1{,}94163; & -1{,}00090 & 0{,}05927\\ -0{,}39494; & 1{,}48274 & -0{,}0878\\ -0{,}496 & -0{,}04872 & 1{,}54472\end{pmatrix}, \qquad (\text{П}.59)$$

$$\widetilde{\mathbf{R}}^{-1}=\begin{pmatrix}R_{\text{п}\,(X)} & R_{\text{п}\,(Y)} & R_{\text{п}\,(Z)}\\ G_{\text{п}\,(X)} & G_{\text{п}\,(Y)} & G_{\text{п}\,(Z)}\\ B_{\text{п}\,(X)} & B_{\text{п}\,(Y)} & B_{\text{п}\,(Z)}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0{,}59700 & 0{,}40300 & 0{,}00000\\ 0{,}17069 & 0{,}79091 & 0{,}03841\\ 0{,}19708 & 0{,}15435 & 0{,}64858\end{pmatrix}. \qquad (\text{П}.60)$$

Найдем координаты $R_{\text{ц}}$, $G_{\text{п}}$, $B_{\text{п}}$ цвета $Ц$ в системе $\text{R}_{\text{п}}\text{G}_{\text{п}}\text{B}_{\text{п}}$ через модули m_R, m_G, m_B основных цветов приемника для этого цвета в системе XYZ. Для этого по аналогии с (2.196), пользуясь (П.15), найдем коэффициенты:

$$f_1 = x_э/y_э = X_э/Y_э = 0{,}310/0{,}316 = 0{,}98101;$$
$$f_2 = z_э/y_э = Z_э/Y_э = 0{,}374/0{,}316 = 1{,}18354. \qquad (П.61)$$

По аналогии с (2.200), (2.128) и (2.203), используя (П.61), (П.6), имеем

$$a_1 = f_1 r'_{п\,(X)} + r'_{п\,(Y)} + f_2 r'_{п\,(Z)};\quad a_2 = f_1 g'_{п\,(X)} + g'_{п\,(Y)} + f_2 g'_{п\,(Z)};$$
$$a_3 = f_1 b'_{п\,(X)} + b'_{п\,(Y)} + f_2 b'_{п\,(Z)}, \qquad (П.61а)$$

$$f_1 r'_{п\,(X)} = 0{,}98101 \cdot 1{,}73009 = 1{,}69724; \qquad r'_{п\,(Y)} = -0{,}48230;$$
$$f_2 r'_{п\,(Z)} = -1{,}18354 \cdot 0{,}26106 = -0{,}30890; \qquad a_1 = 0{,}90604;$$
$$f_1 g'_{п\,(X)} = -0{,}98101 \cdot 0{,}81353 = -0{,}79808; \quad g'_{п\,(Y)} = 1{,}65171;$$
$$f_2 g'_{п\,(Z)} = -1{,}18354 \cdot 0{,}02339 = -0{,}02768; \qquad a_2 = 0{,}82595;$$
$$f_1 b'_{п\,(X)} = 0{,}98101 \cdot 0{,}08344 = 0{,}08186; \qquad b'_{п\,(Y)} = -0{,}16940;$$
$$f_2 b'_{п\,(Z)} = 1{,}18354 \cdot 1{,}28445 = 1{,}52020; \qquad a_3 = 1{,}43266. \qquad (П.62)$$

По (3.88) из (3.56), пользуясь (П.62) и (П.3), найдем коэффициенты: $\alpha = y_R a_1 = 0{,}33 \cdot 0{,}90604 = 0{,}29900$; $\beta = y_G a_2 = 0{,}71 \cdot 0{,}82595 = 0{,}58642$; $\delta = y_B a_3 = 0{,}08 \cdot 1{,}43266 = 0{,}11461$, что соответствует (3.57), в которой расчеты точнее. По аналогии с (2.200), пользуясь (П.61) и (П.6), имеем

$$R_п = m_R/\left(f_1 r'_{п\,(X)} + r'_{п\,(Y)} + f_2 r'_{п\,(Z)}\right) = m_R/a_1 = m_R/0{,}90604;$$
$$G_п = m_G/\left(f_1 g'_{п\,(X)} + g'_{п\,(Y)} + f_2 g'_{п\,(Z)}\right) = m_G/a_2 = m_G/0{,}82595;$$
$$R_п = m_B/\left(f_1 b'_{п\,(X)} + b'_{п\,(Y)} + f_2 b'_{п\,(Z)}\right) = m_B/a_3 = m_B/1{,}43266. \qquad (П.63)$$

По аналогии с (2.103) и (2.189), пользуясь (П.62) и (П.6), найдем

$$p_1 = r'_{п\,(X)}/a_1 = 1{,}73009/0{,}90604 = 1{,}90951; \quad p_2 = g'_{п\,(X)}/a_2 =$$
$$= -0{,}81353/0{,}82595 = -0{,}98496; \quad p_3 = b'_{п\,(X)}/a_3 = 0{,}08344/1{,}43266 = 0{,}05824;$$
$$q_1 = r'_{п\,(Z)}/a_1 = -0{,}26106/0{,}90604 = -0{,}28813; \quad q_2 = g'_{п\,(Z)}/a_2 =$$
$$= -0{,}02339/0{,}82595 = -0{,}02832; \quad q_3 = b'_{п\,(Z)}/a_3 = 1{,}28445/1{,}43266 = 0{,}89655. \qquad (П.64)$$

По аналогии с (2.202), используя (П.64), получим

$$R_п = Y + p_1 s_1 + q_1 s_2 = Y + 1{,}90951 s_1 - 0{,}28813 s_2;$$
$$G_п = Y + p_2 s_1 + q_2 s_2 = Y - 0{,}98496 s_1 - 0{,}02832 s_2;$$
$$B_п = Y + p_3 s_1 + q_3 s_2 = Y + 0{,}05824 s_1 + 0{,}89655 s_2;$$
$$s_1 = X - f_1 Y = X - 0{,}98101 Y; \quad s_2 \quad Z - f_2 Y = Z - 1{,}18354 Y. \qquad (П.65)$$

На эталонном цвете (белое C) имеем $X \quad X_э$; $Y \quad Y_э$; $Z - Z_э$; отсюда с учетом (П.61) получим

$$s_1 - X_э - f_1 Y_э \quad X_э - X_э Y_э/Y_э - 0;$$
$$s_2 = Z_э - f_2 Y_э \quad Z_э - Z_э Y_э/Y_э - 0. \qquad (П.66)$$

Определение взаимной зависимости координат цветности цвета $Ц$ в системах XYZ и $R_ПG_ПB_П$. Найдем зависимость между координатами цветности $r_П$, $g_П$, $b_П$ данного цвета $Ц$ в системе $R_ПG_ПB_П$ и координатами его цветности x, y, z в системе XYZ. Аналогично (2.206) и (2.208) находим используя (П.36):

$$\sigma_1 = R_{П\,(X)} + G_{П\,(X)} + B_{П\,(X)} = m_{(X)};\ \sigma_2 = R_{П\,(Y)} + G_{П\,(Y)} + B_{П\,(Y)} = m_{(Y)};$$
$$\sigma_3 = R_{П(Z)} + G_{П\,(Z)} + B_{П\,(Z)} = m_{(Z)}, \qquad (П.67)$$

$$r_Ц = (R_{П\,(X)}\ x + R_{П\,(Y)}\ y + R_{П\,(Z)}\ z)/Q,$$
$$g_Ц = (G_{П\,(X)}\ x + G_{П\,(Y)}\ y + G_{П\,(Z)}\ z)/Q;$$
$$b_Ц = (B_{П\,(X)}\ x + B_{П\,(Y)}\ y + B_{П\,(Z)}\ z)/Q.\ Q = \sigma_1\ x + \sigma_2\ y + \sigma_3\ z. \qquad (П.68)$$

Используя (П.36), получим

$$\sigma_1 = 1{,}03718;\ \sigma_2 = 1{,}42149;\ \sigma_3 = 0{,}61264, \qquad (П.69)$$

$$r_Ц = (2{,}01383x - 0{,}56140y - 0{,}30387z)/Q;$$
$$g_Ц = (-1{,}03812x + 2{,}10770y - 0{,}02985z)/Q;$$
$$b_Ц = (0{,}06148x - 0{,}12481y + 0{,}94636z)/Q;$$
$$Q = 1{,}03718x + 1{,}42149y + 0{,}61264z. \qquad (П.70)$$

Для белого E ($x = y = z = 0{,}33333$) получим из (П.70) $r_Ц = 0{,}37396$; $g_Ц = 0{,}33853$; $b_Ц = 0{,}28751$; а для белого C ($x = 0{,}31006$; $y = 0{,}31616$; $z = 0{,}37378$) получим отсюда же $r_Ц = g_Ц = b_Ц = 0{,}33333$, что верно.

По аналогии с (2.212) и (2.211) находим

$$\sigma'_1 = R'_{П\,(X)} + G'_{П\,(X)} + B'_{П\,(X)};\ \sigma'_2 = R'_{П\,(Y)} + G'_{П\,(Y)} + B'_{П\,(Y)};$$
$$\sigma'_3 = R'_{П\,(Z)} + G'_{П\,(Z)} + B'_{П\,(Z)}, \qquad (П.71)$$

$$x = (R'_{П\,(X)}\ r_Ц + R'_{П\,(Y)}\ g_Ц + R'_{П\,(Z)}\ b_Ц)/P;$$
$$y = (G'_{П\,(X)}\ r_Ц + G'_{П\,(Y)}\ g_Ц + G'_{П\,(Z)}\ b_Ц)/P;$$
$$z = (B'_{П\,(X)}\ r_Ц + B'_{П\,(Y)}\ g_Ц + B'_{П\,(Z)}\ b_Ц)/P; \qquad (П.72)$$

$$P = \sigma'_1\ r_Ц + \sigma'_2\ g_Ц + \sigma'_3\ b_Ц. \qquad (П.72)$$

Используя (П.50) и (П.42), получим из (П.71) и (П.72):

$$\sigma'_1 = 0{,}85910;\ \sigma'_2 = 0{,}78365;\ \sigma'_3 = 1{,}35724 \qquad (П.73)$$

$$x = (0{,}57560r_Ц + 0{,}16457g_Ц + 0{,}19001b_Ц)/P;$$
$$y = (0{,}28360r_Ц + 0{,}55639g_Ц + 0{,}10858b_Ц)/P;$$
$$z = (0{,}00000r_Ц - 0{,}06269g_Ц + 1{,}05865b_Ц)/P;$$
$$P = 0{,}85910r_Ц + 0{,}78365g_Ц + 1{,}35724b_Ц. \qquad (П.74)$$

Для белого C ($r_Ц = g_Ц = b_Ц = 1/3$) получим из (П.74): $x = 0{,}31006$; $y = 0{,}31616$; $z = 0{,}37378$, что правильно.

Пользуясь (П.70), можно построить на диаграмме цветностей x,y сетку линий постоянных значений $r_Ц$, $g_Ц$, $b_Ц$, показанную на рис. 3.22.

Переход в систему $R_пC_пB_п$ для стандарта СССР. Для перехода из стандартной системы XYZ МКО — 1931 г. в систему $R_пC_пB_п$ основных цветов приемника ЕС (стандарт СССР) используем для получения матрицы $\tilde{F}$ координаты цветности x, y основных цветов приемника ЕС, данные в табл. 3.4 и в качестве равноэнергетического цвета в системе $R_пC_пB_п$ примем белый цвет D_{65}. Тогда рассчитывая аналогично тому, на это сделано выше, получим элементы матриц $\tilde{M}_c$ и $\tilde{M}_c^{-1}$:

$\tilde{M}_c$	$\tilde{M}_c^{-1}$
3,09373; —1,40720, —0,48055; —0,98292; 0,90243; 0,04214; 0,06882; —0,23202; 1,08416	0,42633; 0,21983; 0,01998; 0,33680; 0,69693; 0 12775; 0,17587; 0,07035; 0,92626

Аналогично находим $A' = 0{,}98701$ и элементы матриц $\tilde{A}_0$ и $\tilde{A}_0^{-1}$;

$\tilde{A}_0$	$\tilde{A}_0^{-1}$
3,05351; —1,38891; —0,47429; —0,97014; 1,97770; 0,04159; 0,06792; —0,22901; 1,07007	0,43194; 0,34123; 0,17819; 0,22272; 0,70600; 0,07128; 0,02025; 0,12943; 0,93846

Проводя далее расчет аналогично (П.61) — (П.66), (П.42), (П.71), получим $Q = 2{,}17963x + 0{,}2632y + 0{,}64576z$; $P = 0{,}66614r_п + 1{,}16138g_п + 1{,}17249\ b_п$. Зная элементы матриц $\tilde{M}_c$ и $\tilde{M}_c^{-1}$ получим выражения, аналогичные (П.70) и (П.74).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ньютон И.** Оптика или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света: Пер. с 3-го англ. изд. 1721 г. с прим. С. И. Вавилова.— М.: Гостехиздат, 1954, с. 115—121.
2. **Джадд Д., Вышецки Г.** Цвет в науке и технике. Пер. с англ. — М.: Мир, 1978.— 592с .
3. **Агостон Ж.** Теория цвета и ее применение в искусстве и дизайне: Пер. с англ.— М.: Мир, 1982.—181 с.
4. **Шкловер Д. А.** К вопросу о светлоте и яркости // Светотехника. — 1968.— Вып.— 14. — № 5. — С. 5—10.
5. **Кравков С. В.** Цветовое зрение.— М.: АН СССР, 1951.—175 с.
6. **Ломоносов М. В.** Слово о происхождении света, новую теорию о цветах представляющее, июля 1 дня 1756 г. говоренное. С-Петербург, 1757.— Избранные философские произведения.— М.: Госполитиздат, 1950.— С. 282—305
7. **Федоров Н. Т. и Федорова В. И.** Исследования по цветовому зрению // Доклады АН СССР.— 1935.— С. 1435.

8. **Юстова Е. Н.** Спектральная чувствительность приемников глаза // Доклады А.Н. СССР. — 1950.— Т. 74.— № 6. — С. 1060—1072.
9. **Атлас** стандартных образцов цвета. Тип АЦ-450.— Л.: ВНИИМ, 1970.
10. **Атлас** стандартных образцов цвета на 1000 образцов/Е. Н. Юстова, Г. В. Покровская, К. А. Алексеев, П. Н. Панова, И. З. Пчелкина // Измерительная техника. — 1972.— № 7. — С. 12.
11. **Зусманович В. М.** Эксперименты по «новой теории цвета» // Техника кино и телевидения. — 1960.— № 6. — С 57—59.
12. **Терминология** светотехники. АН СССР, 1957.
13. **ГОСТ** 13088—67. Колориметрия. Термины, буквенные обозначения.
14. **Международный** светотехнический словарь.— М.: Русский язык, 1977.— 278 с.
15. **Гуревич М. М.** Цвет и его измерение.— М.: АН СССР, 1950—268 с.
16. **Юстова Е. Н.** Таблицы основных колориметрических величин.— М.: изд. Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, 1967.— 35 с.
17. **Кустарев А. К.** Об основных цветах физической цветовой системы // Светотехника.— 1965.— № 6. — С. 5—11.
18. **Бескин Н. М.** Деление отрезка в данном отношении.— М.: Наука. 1973.— 64 с.
19. **ГОСТ** 12490—67. Метод измерения цветности излучения кинескопов.
20. **Телевизионный** цветоанализирующий колориметр ТФК-5/В. И. Бичуцкий, С. В. Новаковский, Р. С. Иоффе, Д. А. Шкловер // Техника кино и телевидения.— 1971.— № 2. — С. 40—45.
21. **Кривошеев М. И., Кустарев А. К.** Световые измерения в телевидении. — М.: Связь,1973. — 224 с.
22. **Цифровой** телевизионный колориметр/ И. Г. Александрова, А. В. Барков, С. К. Краснов, С. В. Новаковский // Техника кино и телевидения. — 1974. — № 1. — С. 45 — 49.
23. **Александрова И. Г.** Определение погрешности колориметра КТЦ-5. 0,48 при измерении цветности свечения экрана кинескопа // Техника кино и телевидения. — 1983. — № 7. — С. 46 — 48.
24. **Нюберг Н. Г.** Теоретические основы цветной репродукции.— М.: Советская наука, 1948.— 176 с.
25. **Артюшин Л. Ф.** Основы воспроизведения цвета в фотографии, кино и полиграфии.— М.: Искусство.— 1970.—548 с.
26. **Берлин Б. А.** Гамма-коррекция в цветном телевидении // Техника средств связи. Сер. Техника телевидения.— 1976.— Вып. 2. — С. 18—28.
27. **Новаковский С. В., Исаев А. Н.** Влияние сюжета изображения на выбор цвета свечения экрана кинескопа черно-белого телевидения и равносигнального белого цвета системы цветного телевидения // Техника кино и телевидения. — 1960. — № 9. — С. 58—62.
28. **Кустарев А. К., Дерюгин Н. Г.** Допустимый разброс цветностей при неизменном опорном белом // Техника кино и телевидения.— 1969. — № 10.— — С. 48—55.
29. **Новаковский С. В.** Качество цветопередачи и эксплуатационные показатели приемников ЦТ // Техника кино и телевидения.— 1962.— № 5. — С. 23—31.
30. **Новаковский С. В.** Яркость, контрастность и четкость изображения в основных типах приемников ЦТ // Техника кино и телевидения. — 1962.— Т. 6.— № 3. — С. 33—40.
31. **Аксентов Ю. В., Ерганжиев Н. А., Перевезенцев Л. Т.** Определение допусков на координаты основных цветов телевизионных приемников // Техника кино и телевидения.— 1963.— № 5. — С. 43—50.
32. **Кустарев А. К., Дерюгин Н. Г.** Допустимый разброс цветностей при неизменном опорном белом // Техника кино и телевидения. — 1969.— № 10.— С. 48—55.
33. **Аксентов Ю. В.** О допустимых искажениях цветности в ЦТ // Техника кино и телевидения. — 1969. — № 8. — С. 62 — 65.
34. **Ерганжиев Н. А.** О допустимых искажениях цвета в ЦТ // Техника кино и телевидения. — 1973. — № 3. — С. 39—40.

35. **Качество** цветного ТВ изображения в системе СЕКАМ/О. В. Гофайзен, Т. М. Лихов, Б. М. Певзнер, М. Д. Рувинский // Техника кино и телевидения. — 1983. — № 1. — С. 33—41.
36. **Гитин М. А., Карминский В. А., Кнеллер И. А.** О субъективной оценке качества ТВ изображений // Техника кино и телевидении. — 1983.— № 11. — С. 35—37.
37. **Гофайзен О. В.** Оценка искажений при передаче и воспроизведении цветных изображений // Техника кино и телевидении. — 1983. — № 12. — С. 34 — 39.
38. **Овечкис Н. С.** Пороговые значения цветовых различий для оценки цветопередачи киноизображений // Техника кино и телевидении. — 1976. — № 12. — С. 30—32.
39. **Кустарев А. К., Шендерович А. М.** Искажении цветного телевизионного изображения. — М.: Связь, 1978, 183 с.
40. **Певзнер Б. М.** Качество цветных телевизионных изображений.— М.: Связь, 1980. — 135 с.
41. **Новаковский С. В.** Специальные вопросы цветного телевидении // Американскаи техника и промышленность. — 1947, октибрь. — С. 338—360; 1948, иварь. — С. 26.
42. **Шмаков П. В.** Цветное телевидение.— М.: Госэнергоиздат, 1948. — 103 с.
43. **Шмаков П. В.** Основы цветного и объемного телевидении.— М.: Сов. радио, 1954. — 303 с.
44. **Финк Д. Г.** Стандарт цветного телевидении: Пер. с англ./Под ред. проф. П. В. Шмакова.— М.: Госэнергоиздат, 1960.— 358 с.
45. **Новаковский С. В.** Стандартные системы цветного телевидения. — М.: Связь, 1976. — 367 с.
46. **Кустарев А. К.** Колориметрии цветного телевидении.— М.: Связь, 1967.— 335 с.
47. **Новаковский С. В.** Цветное телевидение (основы теории цветовоспроизведения). — М.: Связь, 1975.— 376 с.
48. **Новаковский С. В.** Определение колориметрических коэффициентов для стандартной системы цветного телевидения, принятой в СССР// Техника кино и телевидения.— 1978.— № 5. — С. 38—40.
49. **Кустарев А. К.** Колориметрическое согласование передающей камеры и приемника ЦТ//Техника кино и телевидения.— 1982.— № 2. — С. 41—44.
50. **Новаковский С. В.** Расчет яркости изображении в приемнике цветного телевидении // Техника кино и телевидения. — 1958 — № 2. — С. 40—47.
51. **Постникова Л. Н., Новаковский С. В.** Искажении цветности и модулиционные характеристики преобразователей «сигнал-свет» в цветном ТВ // Техника кино и телевидения.— 1973.— № 12. — С.43 — 47.
52. **Айгафоров А. П.** Цветные кинескопы.— М.: Радио и связь, 1986.—128 с.
53. **Берлин Б. А., Дубинина Е. А.** Характеристики «сигнал — свет» кинескопов в цветном телевидении // Техника средств связи. Сер. Техника телевидения.— 1976.— Вып. 1.— С. 26—34.
54. **Александрова И. Г., Березина М. А.** Компаратор опорного белого цвета для ТВ приемника // Техника кино и телевидения. — 1983. — № 2. — С. 44—47.
55. **Румянцев Н. Г.** Особенности воспроизведении ТВ изображений в многолучевых ЭЛП // Техника кино и телевидения.— 1984.— № 11. — с. 40—43.
56. **Теория** и практика цветного телевидения/ Под ред. П. В. Шмакова. — М.: Сов. радио, 1972.— 662 с.
57. **Техника** цветного телевидении / Под ред. С. В. Новаковского.— М.: Связь, 1976.—494 с.
58. **Новые** советские передающие телевизионные приборы/Г.С. Вильдгрубе; И. К. Малахов, Р. М. Степанов, В. А. Урвалов // Техника кино и телевидения.— 1977. — № 10. — С. 42—49.
59. **Кустарев А. К., Безшкуренко Л. Т., Смирнова В. И.** Расчет оптимальной матрицы цветокоррекции для ТВ камеры // Техника кино и телевидения. — 1977.— № 9. — С. 55 — 60.

60. **Кузнецова Е. М., Новаковский С. В.** Проектирование цветокорректирующей матрицы для ТВ методом минимизации ошибок видеосигналов // Техника кино и телевидения.— 1981.— № 10.— С. 26—30.
61. **Передающая** ТВ камера TTV1525/M. Артигала, Ж. Бограи, Р. Каэн и др. // Техника кино и телевидения.— 1982.— № 4. — С. 45—50.
62. **Новаковский С. В., Попович А. М.** Светоделительный блок для двухтрубочной камеры цветного телевидения / Техника кино и телевидения.— 1982. — № 11. — С. 46 — 48.
63. **Петропавловский В. А., Постникова Л. Н., Хесин А. Я.** Технические средства телевизионного репортажа. — М.: Радио и связь, 1983.— 128 с.
64. **Однолько В. В., Ожигин А. Ф., Харитонов Ю. А.** Портативные камеры цветного телевидения.— М.: Радио и связь, 1984.—.105 с.
65. **Лунева З. П.,** Направления развития и методы совершенствования телекинодатчиков Техника кино и телевидения.— 1984.— № 2. — С. 24—27.
66. **Маркизов А. С., Михайлов-Теплов Н. Н.** Видиконы ЛИ481 и ЛИ482 для двухтрубочных камер ЦТ с улучшенным качеством изображении // Техника кино и телевидения. — 1984.— № 6. — С. 39—41.
67. **Растровые** цветокодирующие светофильтры для однотрубочных камер ЦТ/ / В. М. Иванова, Л. А. Любавская, Ю. Н. Тарасов, М. Н. Черепанова // Техника кино и телевидения. — 1984.— № 11. — С. 44—48.
68. **Лунева З. П., Новаковский С. В** Телекинодатчики цветного изображении: состояние и перспективы // Техника кино и телевидения.— 1984. — № 11. — С. 36—39.
69. **Галушко В. В.** Генератор испытательных сигналов ТВ трактов // Техника кино и телевидения. — 1984. — № 12. — С. 49—51.
70. **Генератор** сигналов испытательных изображений/ М. И. Кривошеев, Р. А. Майзульс. Г. В. Бабук и др. // Техника кино и телевидения.— 1985. — № 8.— 18 — 22.
71. **А. с.** № 288027 (СССР) Способ получения позитивного изображении/ С. В. Новаковский. Опубл. 1969, Бюл. № 16.
72. **Новаковский С. В., Таубе Н. А., Воронецкий Г. В.** Получение цветного позитивного ТВ изображении с цветной негативной кинопленки // Техника кино и телевидении. — 1972. — № 2. — С.9 — 14.
73. **Цветная** позитивная кинопленка ЦП-11/ П. В. Котерло. А. М. Малеев, Р. Г. Микаэлян и др. // Техника кино и телевидении. — 1982. — № 1. — С. 14 —17.
74. **Выбор** триады красителей позитивных кинопленок из условия цветовоспроизведении / В. А. Зернов, А. М. Малеев, О. А. Набоков и др. // Техника кино и телевидения. — 1983. — № 6. — № 10.— С. 10—16.
75. **Перспективы** и направлении совершенствования цветных кинопленок / З. К. Авербух, Т. М. Кузьвинц, Р. Г. Микаэлян, В. А. Москвиов // Техника кино и телевидения. — 1983. — С. 3—8.
76. **Young T.** On the theory of light and colours. Lectures in Natural Philosophy.— 1807. — V. 2.— London.
77. **Helmholtz H.** Ueber die Theorie der Zusammengesetzten Farben // Muller's Arch. Anat. Physiol. — 1852, 461; Poggendorffs Ann., 87, 1852, S. 45; Phil. Mag. (4), 4, 1852, p. 519.
78. **Willmer E. N.** Color of Small Objects / Nature. — 1944. — V. 153. — P. 774—775.
79. **Hartridge H.** The Change From Trichromatic to Dichromatic Vision in the Human Retina // Nature. — 1945. — V. 155. — P. 657—662.
80. **Middleton W. E., Holms M. C.** The Apparent Colors of Surfaces of small Substense — a preliminary Report // JOSA. — 1949. — V. 39. — P. 582—592.
81. **MacAdam D. L.** Visual Sensitivity to Color Differences in Daylight // JOSA.— V. 32. — 1942 — P. 247.
82. **Mac Adam D. L.** Specification of Small Chromaticity Differences. JOSA // January. — 1943. — V. 33. — P. 18 —26.

83. **Mac Adam D. L.** Note on the Number of Distinct Chromaticities JOSA.— 1947.— V. 37. — N 4. — P. 308—309.
84. **Maerz A., Paul R. A.** Dictionary of Color. 1930; 1950; New York, Mc Grow-Hill.
85 **Munsell** Book of Color, Glossy Finish Collection and Matte Finish Collection / //Munsell Color. Macbeth Division of Kollmorgen Corp. — Baltimore. — 1976.
86. **Mac Adam D. L.** Chromatic Adaptation // JOSA. — 1956. — V. 46. — P. 500.
87. **CIE** (Commission Internationale de l'Eclairage), International Lighting Vocabulary, Publication CIE, N 17, (E — 1,1), CIE, Paris. 1970.
88. **Grassman H.** On the Theory of Compound Colours. Phil. Mag., (4). — 1854.— April. — V. 7. — P. 254—265.
89. **Wright W. K.** A Re-Determination of the Mixture Curves of the Spectrum // // Trans. Opt. Soc. (London). — 1929—1930.— V. 31. — P. 201—218.
90. **Judd D. B.** The 1931 ICI Standard Observer and Coordinate System for Colorimetry // JOSA. — 1933. — V. 23. — P. 359—374.
91. **Wright W. D.** The Measurements of Colour. Adam Hilger Ltd. — 1944; 1969.
92. **Judd D. B.** Radical changes in Photometry and Colorimetry Forshadowed by C. 1. I. actions in Zurich // JOSA. — 1955. — V. 45. — P. 897 — 898.
93. **Wyszecki G., Stiles W.** Color Science, Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulas / J. Wiley. 1967. — New York. —
94. **C. I. E.** Colorimetry, Official Recomendations // International Commission on Illumination. Publication CIE. — 1971. — N 15. (E — 1.3.1.), France.
95. **Judd D. B.** Estimation of Chromaticity Differences and Nearest Color Temperature on the Standard 1931 Colorimetric Coordinate System // JOSA.— 1936. — V. 26. — P. 421.
96. **Mac Adam D. L.** Projective Transformations of I.C.I. Color Specifications// // JOSA., — 1937.— V. 27. — N 8. — P. 294—299.
97. **Bingley F. J.** Transformation of Chromaticity Diagrams // JOSA. — 1954. — V. 44. — N. 2. — P. 109—112.
98 **Mac Adam D. L.** Geodesic Chromaticity Diagram // Die Farbe. — 1970. — N 19. — P. 38.
99. **Shklover D. A.** A New Unifirm Color Space // Die Farbe. — 1971. — 20, N 4/6. — P. 192.
100. **Mac Adam D. L.** Uniform Color Scales // JOSA.— 1974. — 64. — P. 1691—1702.
101. **Wyszecki G.** Uniform Color Scales: CIE 1964 U*V*W* Conversion of OSA Committee Selection // JOSA. — 1975.— V.65.— P. 456 — 460.
102. **McLaren K.** The Development of the CIE (L*a*b*) Uniform Color Space and Colour-Difference Formula. J. SOS // Dyers Colorists.— 1976.—N 92.— P. 338—341.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 4
Глава 1
ЦВЕТ И ЕГО ВОСПРИЯТИЕ 5
1.1. Определение понятия цвета. Цветовой круг Ньютона 5
1.2. Стандартная относительная видность 7
1.3. Психологические и психофизические характеристики цвета 8
1.4. Цветовое зрение 11
1.5. Субъективные эффекты при цветовых ощущениях 15
1.6. Адаптация зрения 17
1.7. Энергетические и фотометрические характеристики лучистой энергии . . . 18
1.8 Отражение и пропускание светового потока 22
Глава 2.
ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КОЛОРИМЕТРИИ 25
1.2. Аддитивное смешение цветов и основные цвета аддитивной смеси. Согласование цветов 25

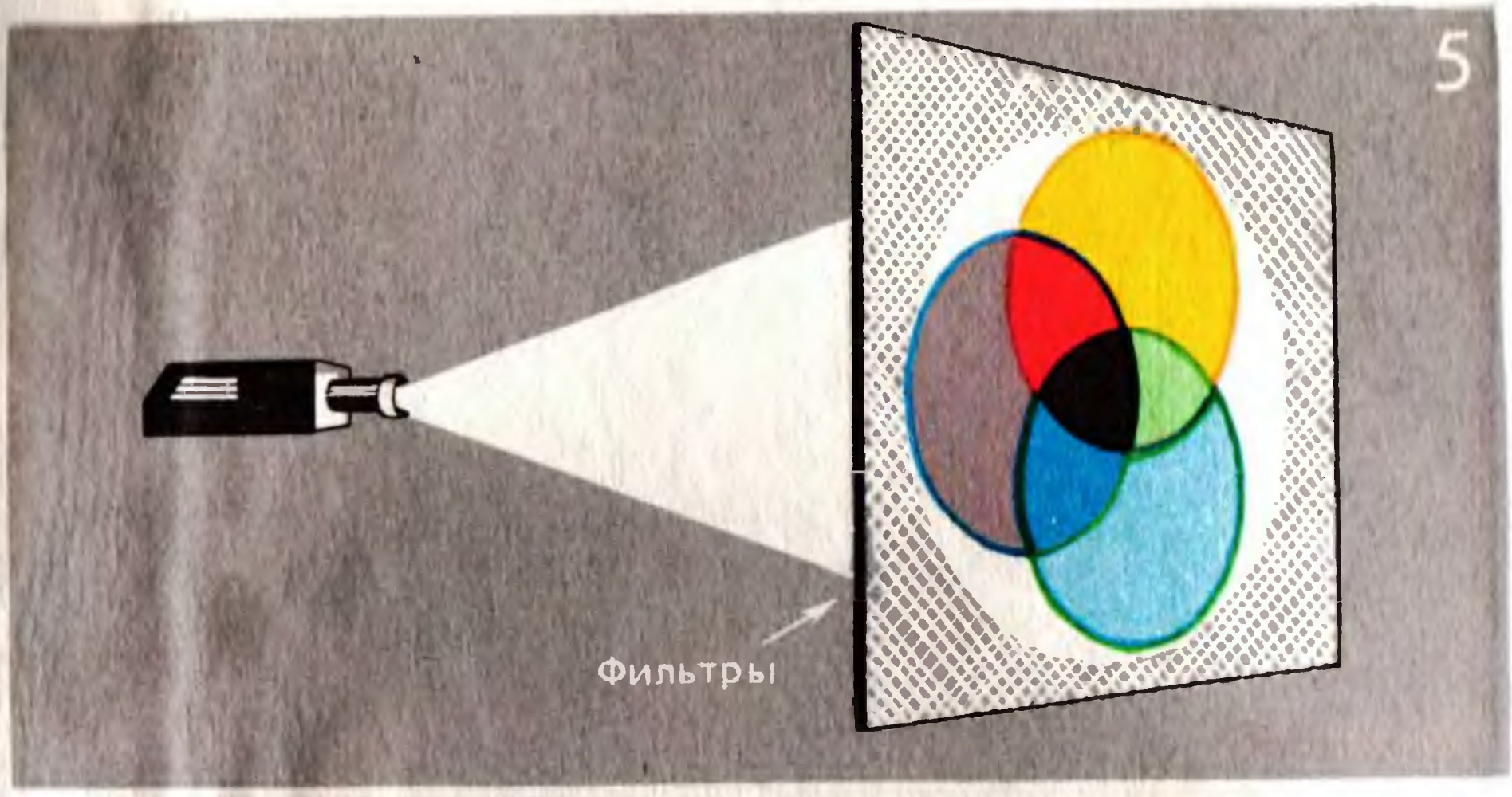
2.2. Способы аддитивного смешения цветов 27
2.3. Законы аддитивного смешения цветов 27
2.4. Трехцветная трихроматическая колориметрическая система определения цвета 29
2.5. Цветовое пространство 35
2.6. Цветовые уравнения в матричной форме 41
2.7. Преобразование цветового треугольника. Простое отношение трех точек прямых 42
2.8. Линейное преобразование координат цвета в цветовом пространстве . . . 48
2.9. Проективное преобразование координат цветности в цветовом пространстве . 63
2.10. Представление цветности на плоскости 65
2.11. Координаты цвета аддитивной смеси нескольких цветов 75
2.12. Стандартная трихроматическая система основных цветов RGB МКО — 1931 г. 77
2.13. Стандартная трихроматическая система основных цветов XYZ МКО — 1931 г. . 84
2.14. Диаграмма цветностей в стандартной системе XYZ МКО — 1931 г. . . . 91
2.15. Цветовые расчеты в системе XYZ МКО — 1931 г. 96
2.16. Кривые смешения 98
2.17. Физиологическая система определения цвета 103
2.18 Локус цветностей излучения абсолютно черного тела 103
2.19. Стандартные источники света МКО 107
2.20. Восприятие цветовых различий 109
2.21. Равноконтрастная диаграмма цветностей *u*, *v* МКО — 1960 г. 111
2.22. Равноконтрастные системы МКО — 1964 — 1976 гг. 117
2.23. Светофильтры и красители и их спектральные характеристики 118
2.24. Цветовые атласы 126
2.25. Объективное измерение цвета 128
2.26. Субтрактивное смешение (воспроизведение) цветов 129

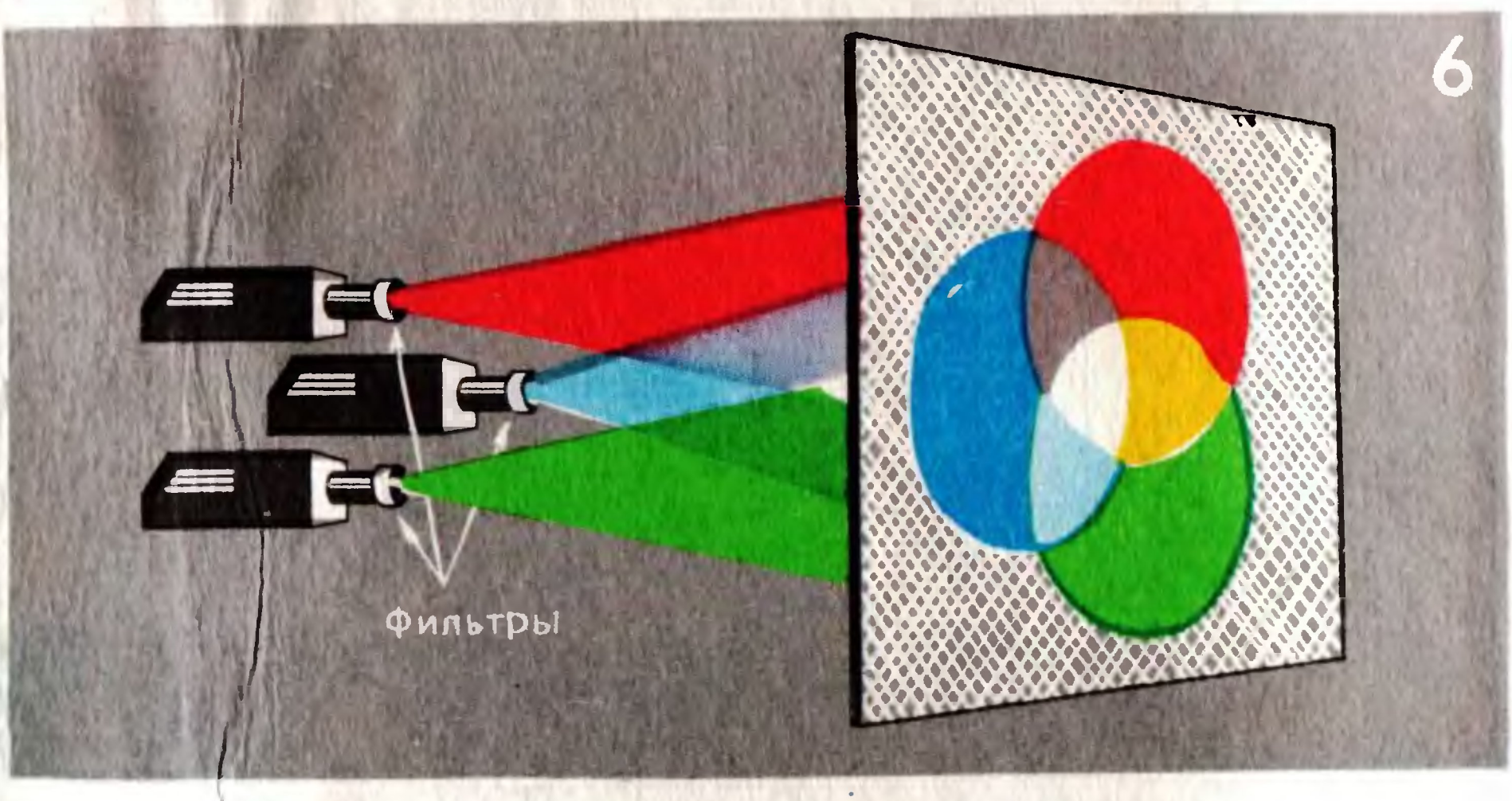
Глава 3.
ЦВЕТНОЕ ТЕЛЕВИЗИОННОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ 130
3.1. Основные требования к качеству воспроизведения цвета в телевидении. Цветовая чувствительность зрения 130
3.2. Восприятие цветности предметов малых угловых размеров 135
3.3. Условия колориметрически правильной цветопередачи 137
3.4. Определение яркостей основных цветов, необходимых для получения заданного цвета их смеси 146
3.5. Построение сетки постоянных значений относительных яркостей основных цветов для получения цвета их смеси 152
3.6. Гамма воспроизводимых цветов в приемнике 159
3.7. Расчет верности цветопередачи в цветном телевидении 167
3.8. Построение сеток постоянных отношений колориметрических параметров изображения 175
3.9. Цветовой баланс в приемнике 192
3.10 Яркость изображения в приемнике цветного телевидения 204

Глава 4.
СИГНАЛЫ ЦВЕТНОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ 206
4.1. Сигнал яркости и цветоразностные сигналы 206
4.2. Принцип постоянной яркости 225
4.3. Спектральные характеристики передающей камеры 234
4.4. Цветокоррекция с помощью матричных схем 243
4.5. Испытательные сигналы цветных полос 252

Глава 5.
ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИЗОБРАЖЕНИЙ КИНОФИЛЬМОВ В ЦВЕТНОМ ТЕЛЕВИДЕНИИ 258
5.1. Воспроизведение яркости в телевизионном изображении кинофильма . . . 258
5.2. Цвет на кинопленке 264
5.3. Яркость и насыщенность цветов в цветном кинофильме и цветном телевидении 268
5.4. Электронное маскирование (логарифмирующая цветокоррекция) 269
5.5. Нелинейная коррекция при передаче изображений цветных кинофильмов . . 272
5.6. Получение позитивного цветного телевизионного изображения с цветной негативной кинопленты 272
Приложение. Переход из стандартной системы XYZ МКО—1931 г. в систему RnGnBn основных цветов приемника NTSC 274
Список литературы 284

4 Проекционный телевизионный экран
для небольших залов и квартир





5 Получение желтого, пурпурного и голубого цветов из белого светового потока с помощью светофильтров

6 Получение желтого, пурпурного и голубого цветов из красного, синего и зеленого световых потоков